



PROTEZIONE CIVILE  
 Presidenza del Consiglio dei Ministri  
 Dipartimento della Protezione Civile



Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77


# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione illustrativa

### Regione Emilia-Romagna

#### Comune di Faenza



Regione EMILIA-ROMAGNA	Soggetto realizzatore	Data
UNIONE ROMAGNA FAENTINA   UNIONE della <b>ROMAGNA            FAENTINA</b>	Raggruppamento Temporaneo di Professionisti Capogruppo: Dott. Geol. Samuel Sangiorgi Mandanti: Dott. Geol. Tiziano Righini Dott. Geol. Antonio Milioto	09/10/2015

**INDICE GENERALE**

1 INTRODUZIONE.....	3
1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi.....	3
1.2 Lo studio di microzonazione sismica preesistente e l'attività di adeguamento.....	5
1.3 Elaborati prodotti.....	7
2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	9
2.1 Riferimenti bibliografici.....	9
2.2 Sismicità storica.....	10
2.3 Sorgenti sismogeniche.....	15
2.4 Altri elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale.....	16
2.4.1 <i>Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL n.112/2007)</i> .....	16
2.4.2 <i>La pericolosità preliminare elaborata per il PSC</i> .....	18
3 ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO.....	21
3.1 Inquadramento geologico strutturale.....	21
3.2 Substrato geologico marino e depositi quaternari.....	22
3.3 Successioni marine affioranti.....	24
3.4 Coperture alluvionali quaternarie.....	25
3.5 Aspetti geomorfologici.....	27
4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	31
4.1 Dati pregressi.....	31
4.2 Le indagini eseguite per la microzonazione sismica.....	36
4.2.1 <i>Indagini geognostiche e geofisiche</i> .....	36
4.2.2 <i>Indagini di laboratorio</i> .....	45
5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	48
5.1 Litologie superficiali prevalenti.....	48
5.2 Sottosuolo profondo.....	51
6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	63
6.1 Considerazioni relative alla risposta sismica locale.....	63
6.2 Liquefacibilità e altri effetti cosismici.....	68
7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI.....	74
7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali – fattori di amplificazione semplificati.....	74
7.2 Zone suscettibili di amplificazioni locali – modelli numerici di amplificazione.....	76
7.3 Verifiche quantitative della liquefacibilità e ulteriori elementi di rischio.....	88
8 ELABORATI CARTOGRAFICI.....	100
8.1 Carta delle Indagini (tavole 1).....	100
8.2 Carta Geologico Tecnica (tavole 2).....	100
8.2.1 <i>Forme di superficie e sepolte</i> .....	101
8.2.2 <i>Terreni di copertura</i> .....	101

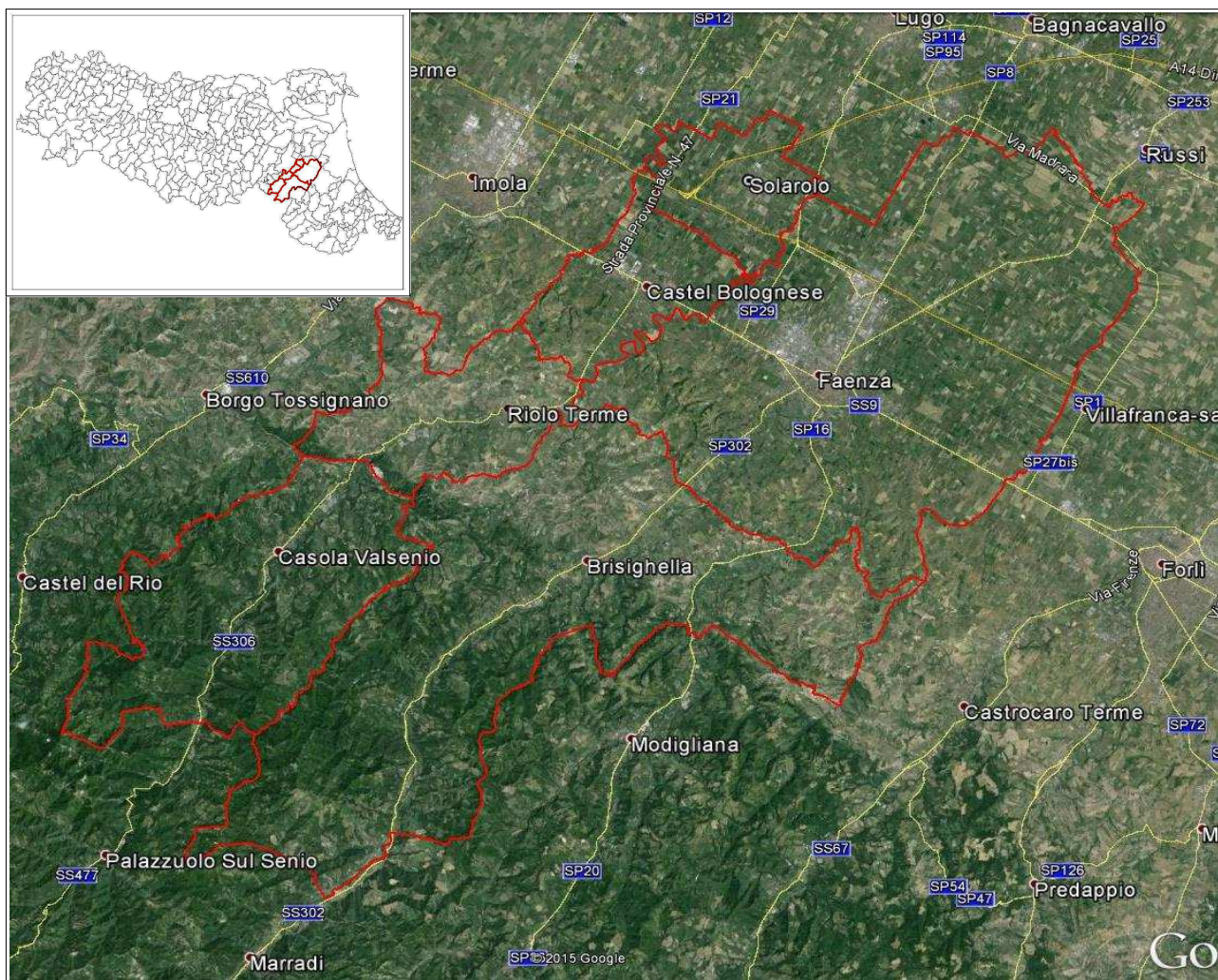
8.2.3 <i>Substrato geologico</i> .....	102
8.2.4 <i>Elementi geologici</i> .....	102
8.2.5 <i>Instabilità di versante</i> .....	103
8.2.6 <i>Elementi tettonico strutturali</i> .....	103
8.3 Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (tavole 3).....	103
8.4 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavole 4).....	104
8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavole 5).....	108
8.6 Carta di microzonazione sismica di livello 3 (tavole 6, 7 e 8).....	109
9 BIBLIOGRAFIA.....	111

## 1 INTRODUZIONE

### 1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

L'Unione dei Comuni della Romagna Faentina (figura 1.1) è risultata destinataria di contributi per la realizzazione di studi di microzonazione sismica del territorio di propria competenza. Tali contributi sono stati finanziati in ossequio al OCDPC 52/2013, recepiti dalla Regione Emilia-Romagna con deliberazione della Giunta Regionale n.1919/2013. In particolare, il contributo è stato destinato alle seguenti attività:

- adeguamento agli standard di archiviazione informatica con analisi CLE (per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme);
- locali approfondimenti di livello 3 (per il Comune di Faenza);
- analisi CLE e locali approfondimenti di livello 3 (per il Comune di Solarolo);



**Figura 1.1** – Localizzazione del territorio amministrativo dell'Unione della Romagna Faentina (da: "Google Earth").

L'Unione dei Comuni della Romagna Faentina ha affidato al dr. Geol. Gabriele Tarabusi il lavoro di adeguamento agli standard di archiviazione informatica dei Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme), mentre ha affidato al Raggruppamento di Professionisti (dr. Geol. Samuel Sangiorgi; dr. Geol. Tiziano Righini; dr. Geol. Antonio Milioto) l'elaborazione delle analisi di microzonazione sismica di terzo livello per l'ambito territoriale del Comune di Faenza e Solarolo. Questi ultimi due Comuni hanno parti di territorio caratterizzate da particolari criticità geologiche in caso di terremoto (susceptibilità alla liquefazione), come già riscontrato dalle precedenti analisi di microzonazione sismica.

Occorre infatti rammentare che l'Unione della Romagna Faentina già dispone di uno studio<sup>1</sup> sismico parzialmente equiparabile ad un primo e secondo livello di approfondimento (S. Marabini, 2009). Questo precedente lavoro è stato elaborato a corredo del Quadro Conoscitivo per il Piano Strutturale Comunale (PSC) in forma associata<sup>2</sup>.

Il presente lavoro è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato C della Delibera n. 1919/2013 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna, dal titolo "Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile 52/13 a favore degli Enti locali".

Per quanto non specificato nel suddetto documento, i riferimenti tecnici per la realizzazione dello studio e per l'elaborazione e la redazione delle tavole cartografiche sono rappresentati dai seguenti testi:

- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 3.0", redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), da qui in avanti "Standard MS 3.0";
- "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica", approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (Gruppo di lavoro MS, 2008; AA.VV., 2011), da qui in avanti "ICMS".

Nella redazione dello studio ci si è inoltre riferiti alle seguenti normative:

- Delibera Assemblea Legislativa (DAL) n. 112/2007 Art. 16 c.1 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica";

---

<sup>1</sup>Piano Strutturale Comunale Associato Faenza – Brisighella – Casola Valsenio – Castel Bolognese – Riolo Terme – Solarolo: Quadro Conoscitivo – Allegato 1 <<Microzonazione sismica degli ambiti urbani sismica locale>> e Quadro Conoscitivo – Sistema Naturale e Ambientale <<Carta della Pericolosità sismica Locale scala 1:50.000>>.

<sup>2</sup>Ai sensi della LR n.20/2000 e ss.mm.

- LR 30/10/2008 n.19 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- DM del 14/01/2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”.

## **1.2 Lo studio di microzonazione sismica preesistente e l'attività di adeguamento**

Scopo della microzonazione sismica è la suddivisione dettagliata del territorio in base al comportamento dei terreni durante un evento sismico e ai possibili effetti indotti dallo scuotimento. Essa rappresenta uno strumento di prevenzione e riduzione del rischio sismico particolarmente efficace se realizzato e applicato già in fase di pianificazione urbanistica.

Costituisce quindi un supporto fondamentale agli strumenti di pianificazione comunale per indirizzare le scelte urbanistiche verso le aree a minore pericolosità sismica.

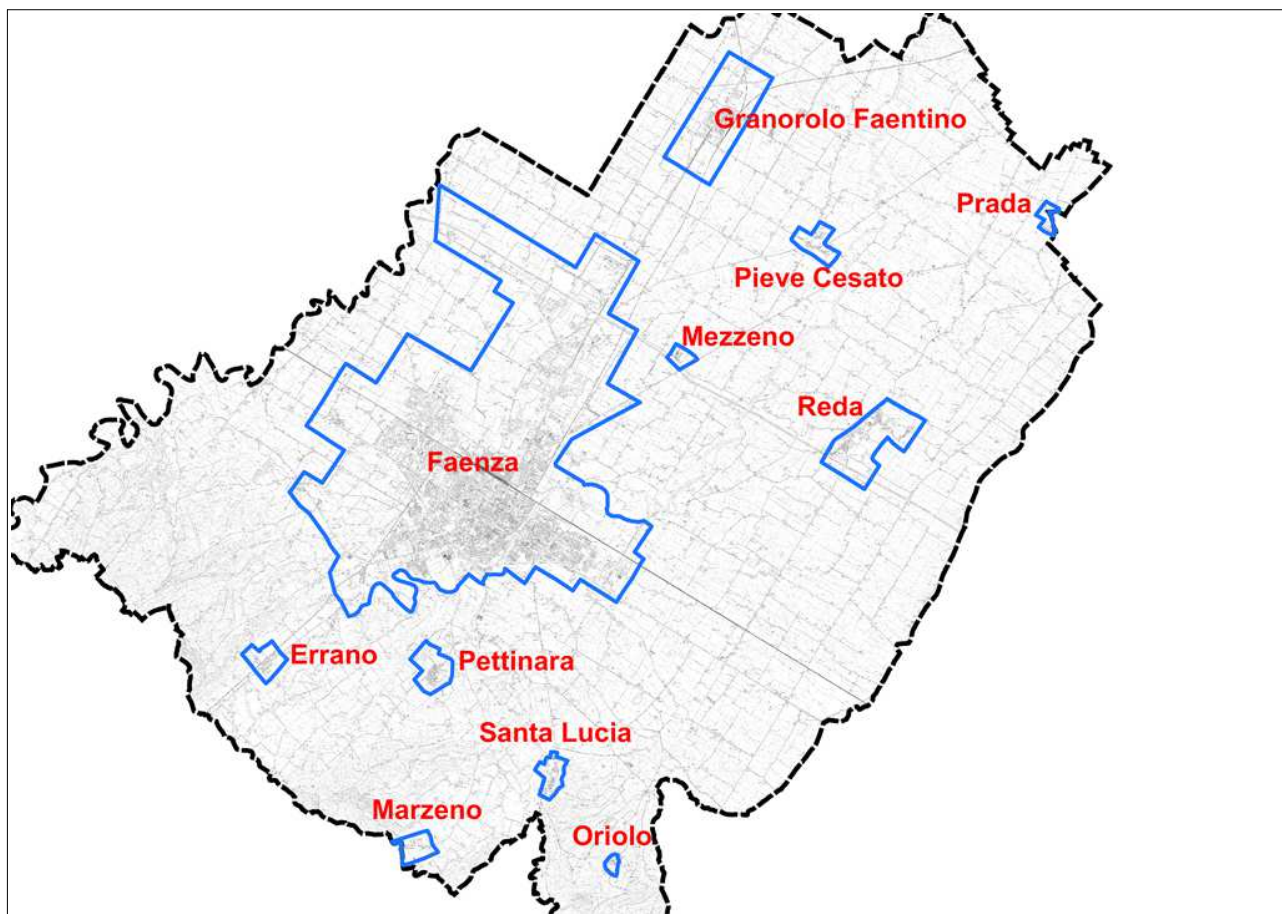
Per ottimizzare costi e tempi la microzonazione sismica è attualmente richiesta nelle aree urbanizzate, in quelle suscettibili di trasformazioni urbanistiche e lungo le fasce a cavallo delle reti infrastrutturali (Regione Emilia-Romagna, 2013).

Per il presente lavoro, l'area oggetto dello studio di microzonazione (definita come "ambiti di studio" nelle cartografie) per ciascun Comune è stata perimetrata dai tecnici dell'Ufficio Associato di Pianificazione Urbanistica dell'Unione. Il perimetro di tali ambiti è identificato in tutte le tavole cartografiche con un tratto di colore azzurro. Nella figura 1.2 si riportano gli ambiti di studio ricadenti nel Comune di Faenza.

Nel 2009, un gruppo di lavoro che aveva come responsabile il dr. Geol. Stefano Marabini e che era coordinato dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (da qui in avanti SGSS), ha realizzato una serie di elaborati per lo studio di microzonazione sismica a scala dell'Unione, che all'epoca hanno rappresentato un riferimento per novità e qualità del prodotto (Marabini, 2009). Nell'ambito dell'attuale studio è stato però necessario procedere ad una completa rivisitazione di quanto esistente e alla realizzazione di diversi nuovi elaborati richiesti dagli attuali standard di archiviazione informatica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013). Lo studio del 2009 aveva infatti previsto, oltre ad elaborati di inquadramento (carte geolitologica, geomorfologica, idrogeologica, ecc.) a scala dell'Unione (1:50.000) e quindi non adeguabili agli standard attuali, la sola "carta di microzonazione sismica" a scala comunale. Tale carta è stata realizzata però solo per il fattore di amplificazione in Intensità Spettrale di Housner (SI) per un intervallo di periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi, ed è quindi solo parzialmente assimilabile alla cartografia di secondo livello richiesta dagli attuali standard.

La necessità di fornire elaborati con contenuti informativi molto diversi e aggiuntivi rispetto a quanto già disponibile dal precedente studio, ha suggerito, sin dalla fase di impostazione del lavoro, di reperire ed archiviare dati di indagini geognostiche e geofisiche realizzate anche dopo il 2009, di eseguire un attento confronto rispetto ai dati più aggiornati della

Cartografia Geologica della Regione Emilia-Romagna e, soprattutto, di realizzare per i Comuni di Faenza e Solarolo degli ulteriori approfondimenti di "livello 3" basati su indagini geognostiche e geofisiche specifiche (campagna misure di microtremore a stazione singola; prove ESAC e "Down-Hole; penetrometrie CPTU; prove di laboratorio su campioni di sedimenti indisturbati prelevati da sondaggio a carotaggio; ecc.), che potessero fornire ulteriori utili indicazioni per l'elaborazione dei modelli sismo-stratigrafici. Tale campagna è stata quindi realizzata dallo studio scrivente sebbene non fosse espressamente prevista dall'incarico di "adeguamento agli standard".



**Figura 1.2** – Localizzazione degli areali di studio nel Comune di Faenza.

La disponibilità di nuovi dati ha permesso di risolvere in parte alcune delle inevitabili incertezze dello studio del 2009 e quindi ad esempio di apportare, in accordo coi tecnici del SGSS regionale, anche alcune modifiche ai contenuti della "carta di microzonazione sismica": sia alle perimetrazioni delle aree che ai fattori di amplificazione ad esse attribuiti (grazie ai dati delle nuove indagini e alle indicazioni aggiornate della Cartografia Geologica). Si è in ogni caso cercato di mantenere il più possibile l'impostazione generale dello studio del 2009, ereditandone in particolare i criteri di suddivisione delle microzone, che rimangono la base concettuale della Microzonazione Sismica.

### 1.3 Elaborati prodotti

I documenti di riferimento e sintesi del presente studio, sono costituiti dalle tavole cartografiche (corredate da sezioni geologiche) e dai dati informatizzati ad esse associati. La presente relazione, oltre a caratterizzare e inquadrare l'area oggetto delle analisi nel contesto geologico e sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie.

Gli elaborati dello studio di microzonazione sismica per il Comune di Faenza sono i seguenti:

- le 32 tavole cartografiche in formato PDF come riportato in tabella 1.1 (e illustrate al capitolo 8);
- l'archivio informatizzato dei dati delle indagini (alfanumerici e cartografici in formato "shp" - shapefile);
- la relazione descrittiva in formato PDF;
- le tre sezioni geologiche (allegato 1) in formato PDF;
- i rapporti delle indagini di nuova esecuzione (allegato 2).

Elaborato cartografico	Comune di Faenza	Comune di Solarolo
Carta delle indagini	Tavola 1d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 1f
Carta geologico-tecnica	Tavola 2d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 2f
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 3f
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 4f
Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	Tavola 5d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 5f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 -FA <sub>PGA</sub>	Tavola 6d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 6f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 -FH <sub>0.1-0.5</sub>	Tavola 7d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 7f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 - FH <sub>0.5-1.0</sub>	Tavola 8d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 8f

**Tabella 1.1** - Elaborati cartografici redatti per lo studio di microzonazione sismica per i Comuni di Faenza e Solarolo. Le lettere al termine del nome della tavola identificano il comune e tengono conto di Brisighella (a), Casola Valsenio (b), Castel Bolognese (c) e Riolo Terme (d), facenti anch'essi parte dell'Unione e oggetto di altro incarico.

Tutti gli elaborati sono stati realizzati secondo le specifiche indicate, per il primo, il secondo e il terzo livello di approfondimento, negli allegati C e D della Delibera n.1919/2013 della Regione Emilia-Romagna. Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile con gli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi, integrandoli con la richiesta di alcuni specifici elaborati aggiuntivi, come specificato al capitolo 8. Si segnala a questo proposito che l'obbligo di attenersi in modo



rigoroso ai suddetti standard di rappresentazione, ha vincolato il presente lavoro sia a livello di articolazione delle tavole (numero e tipologia) e della relazione (titoli e ordine dei capitoli), che a livello di rappresentazione cartografica (tematismi rappresentati, legende e denominazioni, ma anche layout, colori e font dei caratteri) e di contenuti descrittivi.

Si sottolinea che, come previsto dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013) e come dettagliato all'inizio del paragrafo, per tutti i Comuni dell'Unione sono state realizzate quattro distinte serie di elaborati cartografici (tabella 1), rammentando che per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme, le cartografie di microzonazione sismica si riferiscono al "livello 2" di approfondimento, mentre per i Comuni di Faenza e Solarolo si riferiscono al "livello 3".

Le cartografie elaborate hanno utilizzato come base topografica di riferimento lo strato raster fornito dai Comuni dell'Unione. Questa cartografia rappresenta un ulteriore aggiornamento della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5.000 per quanto riguarda lo stato dell'urbanizzato (edifici e viabilità). Per questo lavoro, la base topografica raster è stata georeferenziata secondo il sistema di riferimento richiesto, ovvero nelle coordinate "WGS\_1984\_UTM\_Zone\_33N", per produrre tutti gli strati informativi in formato numerico in coerenza con quanto richiesto dagli Standard.

Per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme, si è deciso di elaborare un'unica relazione con i relativi allegati, in quanto il lavoro è stato condotto in maniera integrata sui quattro comuni e costituisce l'adeguamento di un unico studio realizzato a scala dell'Unione. Le attività svolte, dalla programmazione delle indagini alla suddivisione areale delle carte di microzonazione, sono state infatti condotte senza quasi tenere conto dei confini amministrativi, ma ragionando sempre sull'intera area in esame, nell'ottica di caratterizzare al meglio tutti gli ambiti di interesse a partire da una visione più generale dell'intero territorio dell'Unione che integrasse tutti i dati disponibili (anche di concerto con tutti i soggetti realizzatori degli approfondimenti).

Per i comuni di Faenza e Solarolo, gli approfondimenti espletati di "livello 3" hanno reso necessario redigere due relazioni specifiche, al fine di consentire un'adeguata descrizione delle analisi espletate.

## 2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Riferimenti bibliografici

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale, dunque alla presenza di strutture geologicamente “attive”. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è quindi l'indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le informazioni sui terremoti avvenuti nel passato) e della geologia strutturale locale, fattori strettamente connessi tra loro.

A supporto della redazione del presente capitolo, sono stati utilizzati i dati liberamente consultabili di database pubblici sviluppati da diversi enti e gruppi di ricerca:

- il CPTI11 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2011 (Rovida et al., 2011; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia fino al 2011;
- il DBMI11 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI11 (Locati et al., 2011 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>) e la sua precedente versione DBMI04 (Stucchi et al., 2007);
- il CFTI4Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea (Guidoboni et al., 2007; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>), che riporta per numerose località i risentimenti di circa 300 tra i terremoti storici più forti avvenuti sul territorio italiano, e fornisce anche informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti, sui parametri epicentrali, sugli effetti dei terremoti sull'ambiente fisico (fagliazione superficiale, frane sismo-indotte, liquefazioni, maremoti, ecc.), sul danneggiamento dei centri storici e di beni monumentali;
- la Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>) che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di  $a_g$  (accelerazione orizzontale massima del suolo) e dei principali “parametri spettrali” riferiti all'accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica;
- la Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004; <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica nel territorio nazionale di cui al punto precedente;
- il Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.2.0 (DISS Working Group, 2015 e Basili et al., 2008; <http://diss.rm.ingv.it>), che contiene sorgenti individuali e composite di terremoti, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite) in grado di generare terremoti di M 5.5 o superiore;
- il Catalogo della Sismicità Italiana (Castello et al., 2006; <http://csi.rm.ingv.it/>) che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1981 al 2002;
- il Database ISIDe (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it>), che contiene tutti gli

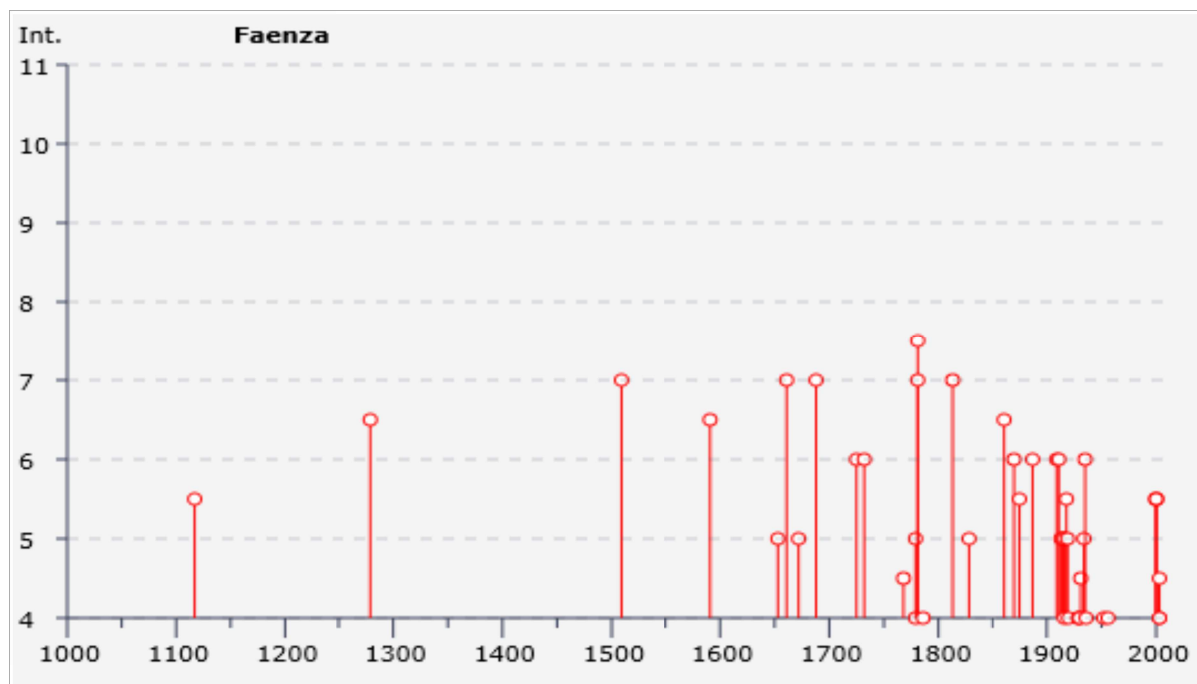
eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 2003 ad oggi.

## 2.2 Sismicità storica

Il DBMI11 (Locati et al., 2011) indica, per l'area dell'Unione, effetti di danno a partire dall'anno 1661 con intensità macrosismiche che arrivano fino al grado IX-X della scala MCS (Sieberg, 1930), registrato in alcune frazioni di Brisighella in occasione del terremoto del 4 aprile 1781. Di seguito si riporta la scheda che sintetizza la storia sismica del Capoluogo Faenza in formato tabellare (figura 2.1) e il grafico con tutti i valori di intensità (figura 2.2).

Effetti	I [MCS]	Data	In occasione del terremoto del: Ax	Np	Io	Mw
5-6		1117 01 03 15:15	Veronese	55	9-10	6.69 ±0.20
6-7		1279 04 30	ROCCA SAN CASCIANO	5	7-8	5.55 ±0.78
F		1504 12 31 04:00	Bolognese	15		
F		1505 01 03 02:00	Bolognese	31	8	5.57 ±0.25
F		1505 01 20 23:50	Bolognese	11		
7		1509 04 19	Faentino	5	7	5.03 ±0.84
6-7		1591 07 10	FORLI'	6	6-7	5.19 ±0.79
5		1653 08 15	CESENA	3	5-6	4.51 ±0.34
7		1661 03 22 12:50	Appennino romagnolo	79	9	6.09 ±0.16
5		1672 04 14 15:45	Riminese	92	8	5.61 ±0.21
7		1688 04 11 12:20	Romagna	39	8-9	5.78 ±0.35
6		1725 10 29 17:40	Appennino tosco-emiliano	28	8	5.43 ±0.34
6		1732 08 09	FAENZA	3	6	4.72 ±0.34
F		1751 07 27 01:00	Appennino umbro-marchigiano	68	10	6.25 ±0.22
4-5		1768 10 19 23:00	Appennino romagnolo	45	9	5.87 ±0.21
4		1779 06 01 23:55	Bolognese	8		
F		1779 06 02 07:30	Bolognese	3		
5		1779 06 04 07:00	Bolognese	13	7	5.24 ±0.52
3		1779 06 10 08:35	Bolognese	10		
3		1779 07 14 19:30	Bolognese	17		
F		1779 11 23 18:30	Bolognese	14	5	4.99 ±0.31
7-8		1781 04 04 21:20	Romagna	96	9-10	5.94 ±0.17
7		1781 07 17 09:40	Romagna	46	8	5.58 ±0.26
4		1786 12 25 01:00	Riminese	91	8	5.62 ±0.17
7		1813 09 21 07:45	Romagna centrale	12	7	5.27 ±0.94
5		1828 10 08 22:30	Romagna meridionale	8	5-6	4.35 ±0.72
6-7		1861 10 16	FORLI'	10	6-7	5.10 ±0.48
6		1870 10 30 18:34	Romagna	41	8	5.58 ±0.27
2-3		1874 10 07	IMOLESE	60	7	5.02 ±0.18
5-6		1875 03 17 23:51	Romagna sud-orientale	144		5.93 ±0.16
3		1881 02 12	RUSSI	14	5-6	4.95 ±0.39
6		1887 09 30 15:55	Faenza	10	5	4.33 ±0.50
NF		1897 12 18 07:24:20	Appennino umbro-marchigiano	132	7	5.13 ±0.14
NF		1904 02 25 18:47:50	Reggiano	62	6	5.05 ±0.18
NF		1904 11 17 05:02	Pistoiese	204	7	5.15 ±0.14
6		1909 01 13 00:45	BASSA PADANA	799	6-7	5.53 ±0.09
3		1911 02 19 07:18	Romagna meridionale	181	7	5.28 ±0.11
6		1911 03 26 20:20:50	Eremo di Camaldoli	8	6	4.71 ±0.46
5		1913 07 21 22:35	VALLE DEL LAMONE	43	5-6	4.78 ±0.19
5		1914 10 27 09:22:36	Garfagnana	618	7	5.76 ±0.09
5		1916 05 17 12:49:50	Alto Adriatico	132		5.95 ±0.14
4		1916 06 16 01:27	Alto Adriatico	17		
5		1916 08 16 07:06	Alto Adriatico	257		6.14 ±0.14
5-6		1918 11 10 15:12:28	Appennino romagnolo	187	9	5.88 ±0.11
5		1919 06 29 15:06:12	Mugello	566	10	6.29 ±0.09
4		1920 09 07 05:55:40	Garfagnana	756	10	6.48 ±0.09
F		1924 01 02 08:55:08	Medio Adriatico	76	7-8	5.36 ±0.16
4		1929 04 10 05:43:12	Bolognese	87	7	5.03 ±0.13
3		1929 04 11 00:56:08	Bolognese	10		5.02 ±0.37
2-3		1929 04 19 04:15:22	Bolognese	82		
3		1929 04 20 01:09:46	Bolognese	109	7	5.34 ±0.13
4		1929 07 18 21:01:58	Mugello	56	6-7	5.02 ±0.17
4		1930 10 30 07:13:13	SENIGALLIA	263	8	5.81 ±0.09
4-5		1931 04 05 13:34	Faentino	14	6	4.80 ±0.25
3-4		1931 09 05 01:25:53	Mugello	28	6	4.80 ±0.22
5		1934 11 30 02:58:19	Alto Adriatico	51		5.34 ±0.17
6		1935 06 05 11:48:02	Faentino	27	6	5.16 ±0.25
4		1936 10 18 03:10:12	BOSCO CANSIGLIO	267	9	6.12 ±0.09
3		1951 05 15 22:54	LODIGIANO	154	6-7	5.39 ±0.14
4		1952 07 04 20:35:12	Appennino romagnolo	64	7	4.99 ±0.18
3		1956 04 26 03:00:03	Appennino tosco-emiliano	75	6	4.77 ±0.14
4		1956 05 26 18:39:57	Appennino romagnolo	79	7	4.99 ±0.15
2		1956 06 03 01:45:57	Appennino romagnolo	62		
3		1957 04 17 02:22:36	S. SOFIA	14	6	4.71 ±0.22
2		1960 10 29 00:08:39	Mugello	69	7	4.97 ±0.15
3		1963 07 19 05:45:28	Mar Ligure	463		6.02 ±0.14
3-4		1980 11 23 18:34:52	Irpinia-Basilicata	1394	10	6.89 ±0.09
2-3		1983 11 09 16:29:52	Parmense	850	6-7	5.06 ±0.09
2-3		1984 04 29 05:02:60	GUBBIO/VALFABBRICA	709	7	5.65 ±0.09
NF		1986 12 06 17:07:20	BONDENO	604	6	4.61 ±0.10
5-6		2000 05 06 22:07:04	Emilia Romagna	84	5	4.17 ±0.09
5-6		2000 05 08 12:29:56	Emilia Romagna	126	5	4.66 ±0.09
5-6		2000 05 10 16:52:12	Emilia Romagna	151	5-6	4.86 ±0.09
4		2003 01 26 19:57:03	Forlivese	35	6	4.70 ±0.09
3-4		2003 01 26 20:15:03	Forlivese	72		4.56 ±0.09
4-5		2003 09 14 21:42:53	Appennino bolognese	133	6	5.29 ±0.09

Figura 2.1 – Elenco dei terremoti significativi per il Comune di Faenza e macrointensità stimata (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano 2011). In evidenziato: gli eventi con IMCS >6.



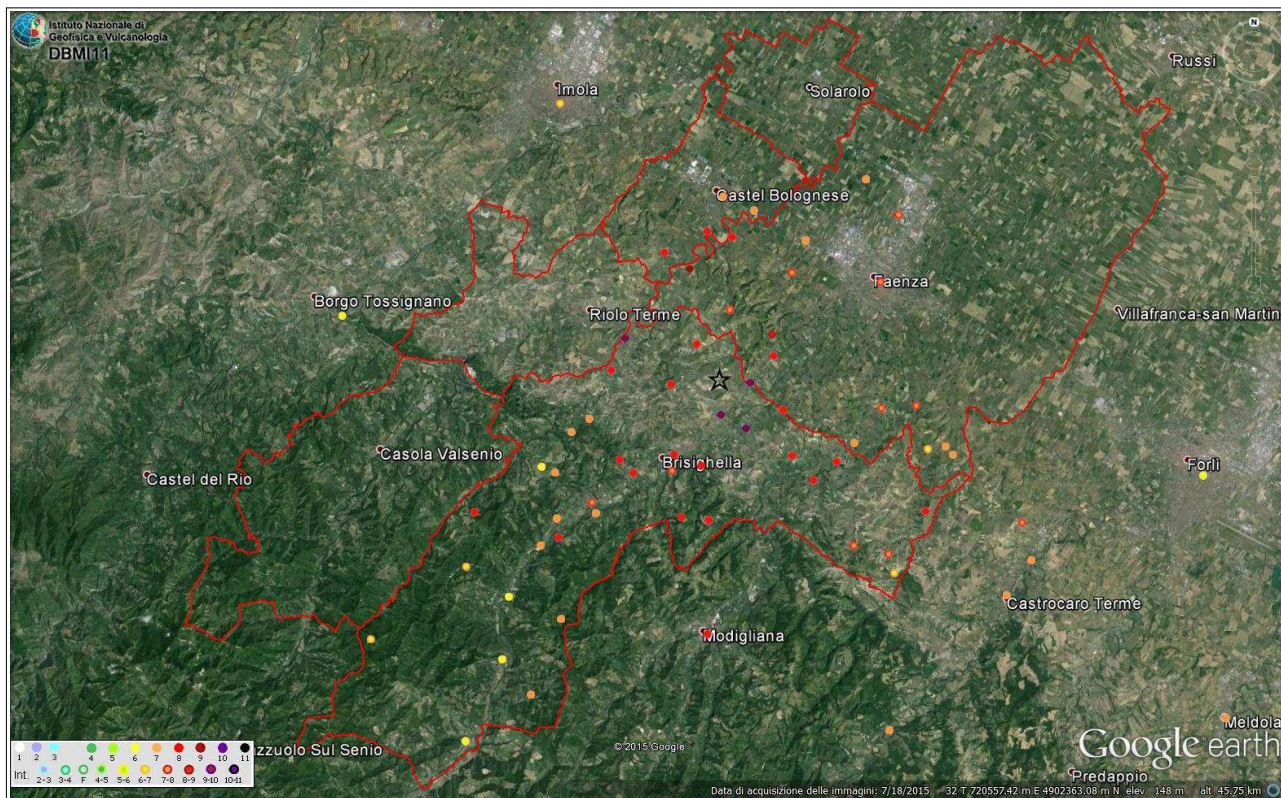
**Figura 2.2** – Distribuzione e macrontensità stimata dei terremoti significativi per il Comune di Faenza (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano 2011).

Secondo quanto riportato nel DBMI, l'evento sismico che ha prodotto i danni maggiori nel Faentino, soprattutto nel Comune di Brisighella è quello del 4 aprile 1781 (a cui è attribuita una magnitudo di oltre 5.9), di cui è riportata in figura 2.3 la mappa degli effetti. Come è possibile osservare, i maggiori effetti (grado IX-X MCS), con crolli e distruzioni diffusi, sono localizzati proprio in comune di Brisighella (Poggio, San Ruffillo, Villa San Giorgio in Vezzano) o al confine con quello di Faenza (Quartolo). L'epicentro macrosismico, in sostanza il "baricentro" degli effetti, è collocato infatti in comune di Brisighella in prossimità del confine con Faenza. Per questa sequenza sismica il catalogo CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007) riporta la seguente sintesi degli effetti:

*la scossa del 4 aprile, avvenuta alle ore 21:20 GMT circa, ebbe effetti disastrosi soprattutto nei dintorni di Brisighella dove 5 villaggi subirono la distruzione della quasi totalità del patrimonio edilizio: a Poggio crollarono 13 case su 18; a Quartolo 9 su 11; a Villa San Giorgio in Vezzano 36 su 40; a San Ruffillo 37 su 42; a Tebano su 42 case 2 crollarono completamente e 36 subirono crolli parziali e divennero pericolanti. Una ventina di altre località, quasi tutte del Faentino, subirono danni gravi. In particolare nell'area extraurbana di Faenza crollarono o furono gravemente lesionate 694 case, 46 chiese e 47 canoniche su un totale di oltre 2000 edifici (circa il 39%). A Faenza furono giudicati inabitabili 247 edifici su 1.832 (13% circa). L'area in cui il terremoto fu sentito fu molto ampia, da Lucca a Venezia.*

*Un'altra scossa, avvenuta il 17 luglio alle ore 9:40 GMT circa, pur meno forte di quella precedente, causò tuttavia gravi danni nella valle del fiume Montone, tra Faenza e Forlì. Crollarono case a Corleto e Scaldino, a Forlì i danni furono molto gravi; una quindicina di altre località, tra le quali Ravenna, subirono forti danni. A*

*Ravenna furono danneggiati il palazzo apostolico, il duomo e le chiese di S. Giovanni Battista delle Catene, di S. Domenico, di S. Giovanni Evangelista e di S. Maria di Porto. Furono nuovamente danneggiati Faenza e il suo contado dove, complessivamente, su oltre 2200 edifici ne divennero inabitabili 406 (18%). L'area in cui questa scossa fu sentita si estese da Lucca a Vicenza.*



**Figura 2.3** – Gli effetti della scossa del 4 aprile 1781 in rapporto alle aree oggetto di studio (confini comunali distinti col tratto rosso). L'epicentro macrosismico è rappresentato con la stella nera.

Secondo quanto riportato nel DBMI, altri due eventi sismici hanno invece prodotto danni maggiori soprattutto a Casola Valsenio (grado VII-VIII MCS), entrambi con epicentro macrosismico localizzato nel territorio comunale di Casola Valsenio e appartenenti a lunghe sequenze sismiche ed entrambi preceduti da scosse di minore intensità nei giorni precedenti: quello del 29 ottobre 1725 e quello del 27 aprile 1879.

Per la sequenza sismica del 1725 il catalogo CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007) riporta la seguente sintesi degli effetti:

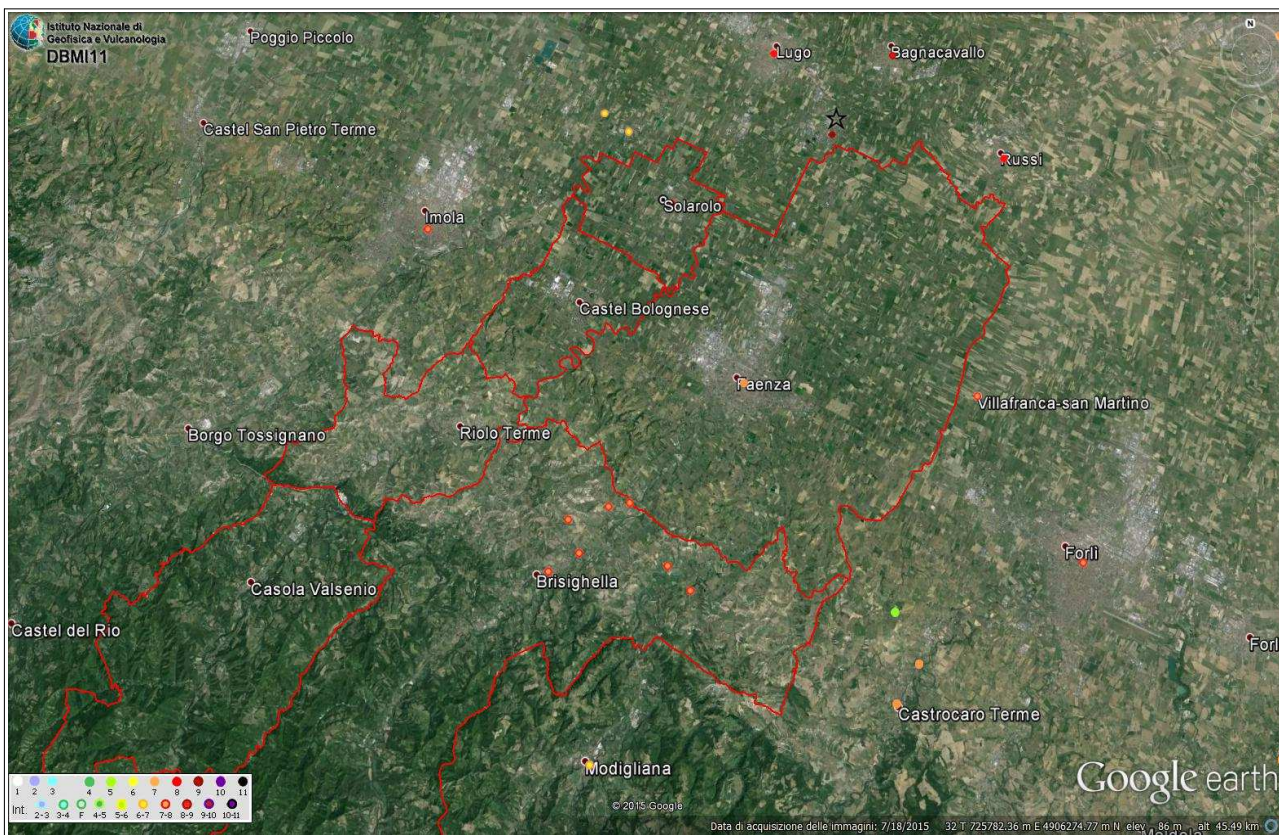
*La scossa principale avvenne il 29 ottobre 1725 alle ore 17:40 GMT ca. (ore 1 della notte, in orario "all'italiana"); era stata preceduta da una scossa più leggera la sera precedente e fu seguita da una replica non forte alle ore 20:00 GMT circa (ore 4 della notte). La zona più colpita fu l'area appenninica toscoro-magnola fra le valli dei fiumi Santerno e Lamone. I danni più gravi avvennero a Castel del Rio, Fontanelice (all'epoca Fontana), Marradi, Palazzuolo sul Senio, Tossignano, dove vi furono crolli di abitazioni ed edifici religiosi. A Casola Valsenio la scossa causò il crollo del convento e della chiesa dei Domenicani; a*

*Modigliana cadde la copertura del mastio della fortezza e furono danneggiati i muri e i soffitti della cappella di Santa Barbara. La scossa fu avvertita sensibilmente a Bologna e più leggermente a Firenze.*

Per la sequenza sismica del 1879 il catalogo CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007) riporta la seguente sintesi degli effetti:

*Il periodo sismico fu caratterizzato da oltre 500 scosse di varia intensità avvertite fra il 25 aprile e il 3 maggio 1879. La scossa principale avvenne il 27 aprile 1879 alle ore 4:06 GMT ca. e colpì la vallata del Senio nell'Appennino tosco-romagnolo. Il terremoto ebbe i suoi massimi effetti a Casola Valsenio e a Palazzuolo sul Senio: nella prima località vi furono gravi danni alle abitazioni e, nella campagna circostante, crollarono varie case rurali; nella seconda molte case subirono danni notevoli. La scossa fu avvertita più o meno fortemente, ma senza danni, a Pieve di Casio, Modigliana, Borgo Tossignano, Castel del Rio, Guzzano, Firenze e Bologna. Numerose repliche furono avvertite successivamente, fino al 13 agosto 1879.*

Un ulteriore evento sismico significativo, che ha prodotto effetti maggiori nella “bassa romagna”, soprattutto a Cotignola (figura 2.4), ma che ha causato danneggiamenti anche nei Comuni di Solarolo (intensità macrosismica stimata pari a 8) e Faenza, è quello del 4 novembre 1688, a cui è attribuita una magnitudo di circa 5.78 (epicentro macrosismico localizzato nei pressi di Cotignola). Per questo sisma, il catalogo CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007) riporta la seguente sintesi degli effetti:



**Figura 2.4** – Gli effetti della scossa dell'11 aprile 1688 in rapporto alle aree oggetto di studio (confini comunali distinti col tratto rosso). L'epicentro macrosismico è rappresentato con la stella nera.

la scossa distruttiva avvenne l'11 aprile 1688 alle 12:20 GMT circa (ore 18 secondo l'uso orario "all'italiana") ed ebbe una durata di circa 20 secondi [...]. La località più danneggiata fu Cotignola, dove ci furono distruzioni estese a gran parte dell'abitato: 68 case crollarono totalmente e tutte le altre furono danneggiate gravemente e molte rese inabitabili; gravi danni subirono anche gli edifici pubblici ed ecclesiastici del paese, in particolare la chiesa parrocchiale di S. Stefano di cui crollò il tetto e furono gravemente lesionate le navate e il campanile. Danni molto gravi furono rilevati anche a Bagnacavallo: 40 case crollarono totalmente e quasi tutte le altre furono danneggiate; molti edifici di rilievo fra cui 11 chiese con gli annessi edifici monastici crollarono parzialmente o furono lesionate in modo grave. A Solarolo, Russi e Lugo ci furono crolli di abitazioni. Danni rilevanti avvennero in altre 15 località circa, fra cui Forlì, Imola, Cesena e Ravenna. La scossa fu sentita in modo molto forte a Bologna e a Venezia, dove causò leggeri danni sporadici; più leggermente fu avvertita fino a Padova a nord e fino a Firenze a sud. La scossa principale fu seguita da numerose repliche. Le più forti avvennero il 27 e 28 maggio 1688 e causarono qualche ulteriore danno a Imola e Faenza. Un grosso macigno si staccò dal monte sovrastante il paese di Brisighella causando gravi danni.

Occorre infine rammentare che, nella primavera del 2000, l'area Faentina e Forlivese è stata interessata da una sequenza di sismi di lieve e medio-bassa energia che, sebbene abbia provocato una diffusa preoccupazione tra la popolazione per il perdurare delle scosse, ha prodotto danni generalmente leggeri (classificati fino al VI° MCS in due casi rispettivamente a Faenza e Brisighella), ma piuttosto diffusi (caduta di intonaci, lesioni capillari) e risultato del cumulo dei diversi eventi osservati. Va inoltre sottolineato che, in generale, il danneggiamento ha interessato prevalentemente edifici vulnerabili, o per tipologia edilizia o per condizioni di manutenzione. Complessivamente, sono stati registrati 70 eventi con magnitudo 3 o superiore, di cui 11 scosse con magnitudo superiore a 3.8. La più elevata (10 maggio 2000), ha raggiunto una magnitudo momento pari a 4.86.

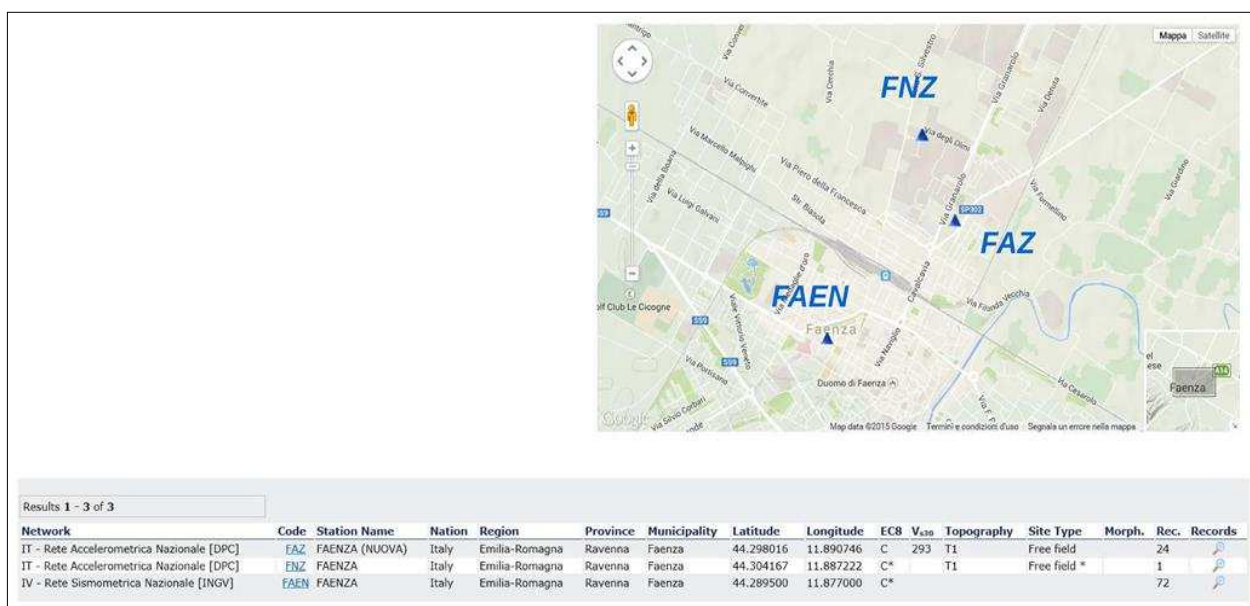


Figura 2.5 – Localizzazione delle stazioni accelerometriche di Faenza (Fonte: INGV).

Lo sciame sismico del 2000 è stato registrato dalle stazioni accelerometriche situate nel nel Capoluogo Faenza (figura 2.5). In particolare, la stazione "FNZ" (Rete Accelerometrica Nazionale) ha consentito di misurare una  $ag$  massima al suolo pari a  $108,09 \text{ cm/s}^2$  (cioè pari a  $0,110g$ ) per la principale scossa 10 maggio.

### 2.3 Sorgenti sismogeniche

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano - ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, l'area in esame ricade principalmente entro la Zona 914, mentre soltanto la porzione più settentrionale del territorio amministrativo di Faenza ricade nella Zona 912. Entrambe le zone sono caratterizzate da un valore di  $M_{w_{max}}$  pari a 6.14.

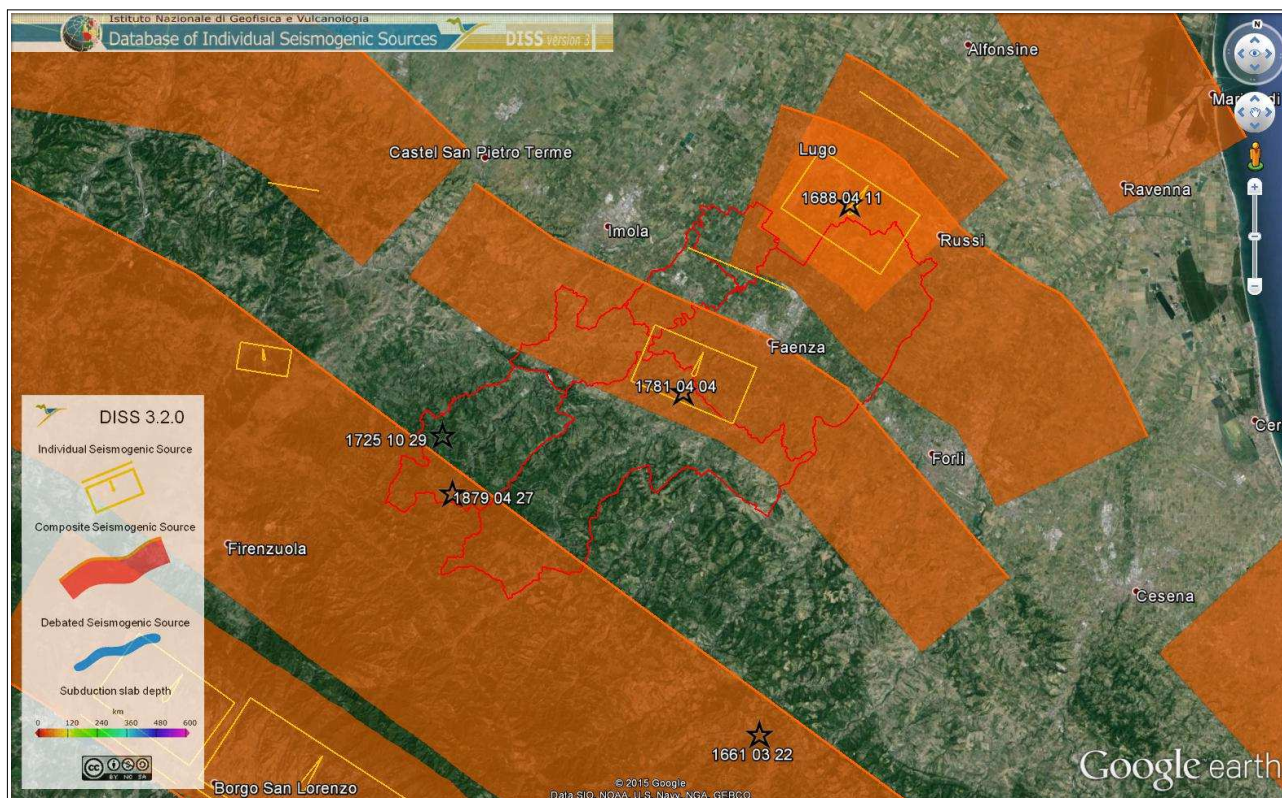
Il database DISS (DISS Working Group, 2015) indica la presenza di tre sorgenti sismogenetiche che, complessivamente, attraversano la vasta area dell'Unione dei Comuni della Romagna Faentina. Come evidenziato dalla figura 2.6, gli epicentri macrosismici dei terremoti che hanno dato luogo ai maggiori risentimenti nei Comuni montani e collinari dell'area di studio, sono attribuibili a diverse sorgenti sismogenetiche composite del sistema compressivo appenninico, un sistema di faglie con vergenza nord-est. Anche per i Comuni di pianura, gli effetti di macrosismicità sono riconducibili a sorgenti sismogenetiche composite che derivano dal sistema di faglie del margine avanzato e sepolto dell'arco appenninico.

I principali effetti risentiti a Casola Valsenio sono dovuti ai terremoti del 1725 e 1879, riconducibili all'attività della sorgente *ITCS027 - Bore-Montefeltro-Fabriano-Laga*, che è collocata ad una profondità compresa tra 12 e 22 km di profondità, ha uno *slip rate* compreso tra 0,1 e 0,5 mm/anno e a cui è associata una magnitudo massima di 6.2 (derivata però da sorgenti individuali dell'Appennino Umbro-Marchigiano lontane dall'area di studio). Il terremoto del 1781, che ha prodotto i massimi effetti di danno registrati storicamente nei Comuni di Faenza e Brisighella, è invece associato alla sorgente *ITCS001 - Castel San Pietro Terme-Meldola*, che è collocata ad una profondità compresa tra 2 e 8 km di profondità, ha uno *slip rate* compreso tra 0,24 e 0,63 mm/anno e a cui è associata una magnitudo massima di 5.8 (derivata dalla sorgente individuale *ITIS093 - Faenza*, associata proprio al terremoto del 1781, così come definito nella versione 04 del catalogo CPTI).

Per il Comune di Solarolo, i principali effetti sono dovuti ai terremoti del 1688 e dell'aprile 1509. Quest'ultimo colpì un'area particolarmente ristretta della Romagna tra Faenza e Solarolo, dove causò dissesti e crolli parziali di edifici pubblici e di strutture militari. Entrambi i terremoti sono riconducibili all'attività delle due sorgenti composite associate: la *ITCS011 - Mordano - Guarniera* e la *ITCS109 - Fusignano - Villanova*, entrambe



collocate ad una profondità compresa tra 2 e 10 km di profondità e con *slip rate* tra 0,10 e 0,33 mm/anno. A queste due sorgenti composite è associata una magnitudo massima di 6.0 (derivata dalla sorgente individuale *ITIS100 – Bagnacavallo* e associata al citato terremoto di Cotignola del 1688 e da altri terremoti avvenuti nella pianura romagnola).



**Figura 2.6** - Le sorgenti sismogenetiche del database DISS 3.2.0, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è distinta l'area dei comuni oggetto di studio. In nero sono rappresentati gli epicentri macrosismici dei principali eventi citati al paragrafo 2.2.

## 2.4 Altri elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale

### 2.4.1 Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL n.112/2007)

Gli Indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (Regione Emilia-Romagna, 2007), sono stati elaborati sulla scorta degli esiti delle indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale a partire dalla fine degli anni '70 del secolo scorso e assumendo come riferimento (per gli studi applicati alla pianificazione territoriale), la pericolosità di base elaborata da INGV (recepita a livello nazionale dall'OPCM 3519/2006). In questo senso, gli allegati della citata Delibera forniscono tabelle e formule propedeutiche alla valutazione semplificata dell'amplificazione locale (analisi di "secondo livello").

Gli allegati alla Delibera regionale forniscono, inoltre, i dati fondamentali per valutazioni più

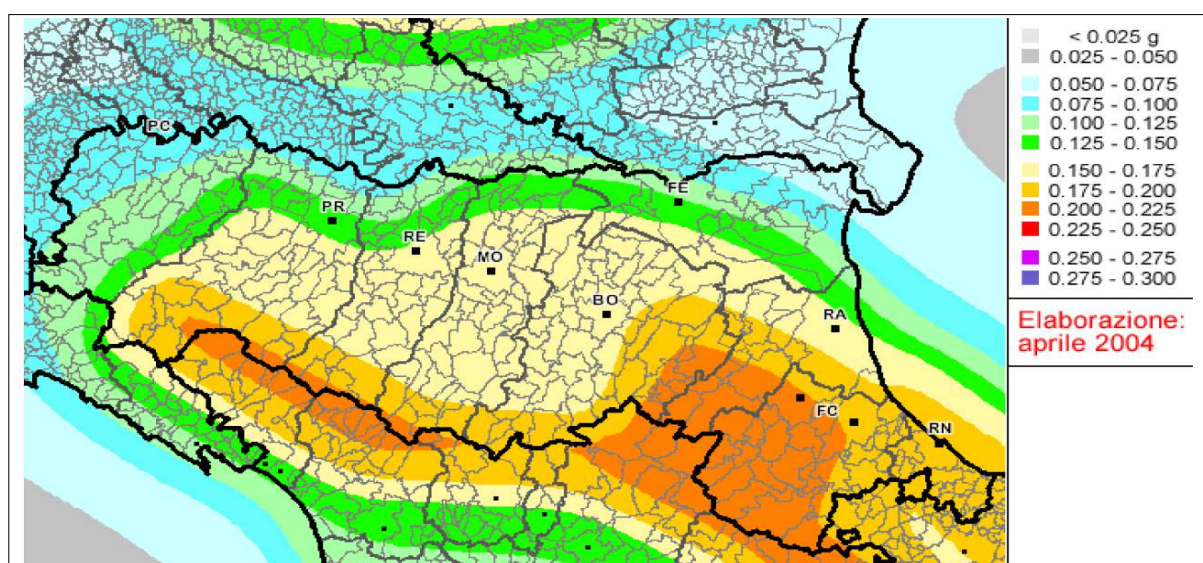
accurate della risposta sismica: lo spettro di risposta normalizzato di riferimento per l'Emilia-Romagna, per  $T_r = 475$  anni, con smorzamento pari al 5% e i valori di PGA anch'essi normalizzati e riferiti al suolo rigido, per ogni Comune della Regione. Si precisa che tale forma spettrale è sostanzialmente congrua con lo spettro elastico di riferimento per le norme tecniche per le costruzioni attualmente vigenti (NTC 2008).

Per il territorio amministrativo dell'Unione della Romagna Faentina, le PGA di riferimento su suolo rigido attribuita dalla Regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna, 2007 - Allegato A4) risultano:

Brisighella 0,210g	Faenza 0,205g
Casola Valsenio 0,209g	Riolo Terme 0,208g
Castel Bolognese 0,206g	Solarolo 0,200g

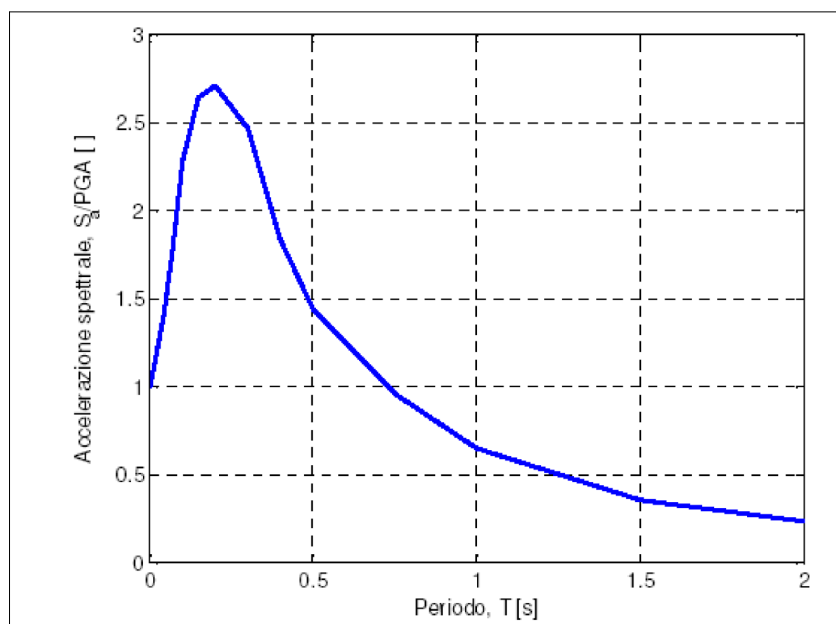
Occorre precisare che, per permettere che i risultati degli studi di microzonazione siano confrontabili a scala comunale, il valore di PGA di riferimento al suolo rigido riportato nella DAL 112/2007 è unico per ciascun comune, ma è calcolato mediando i dati INGV alla scala nazionale, sintetizzati nella Mappa di Pericolosità Sismica nazionale (Gruppo di lavoro MPS04, 2004), riportata in figura 2.7, e calcolati su una griglia di punti.

La mappa nazionale MPS04 (Gruppo di lavoro MPS04, 2004) descrive infatti anch'essa la pericolosità sismica attraverso il parametro dell'accelerazione massima attesa su suolo rigido e pianeggiante, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni: i valori sono però attribuiti ad ogni punto della griglia di calcolo, costruita per tutto il territorio nazionale (griglia con una densità di 20 punti per grado, ossia circa un punto ogni 5 km). Tale mappa è diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale con l'emanazione dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006).



**Figura 2.7** – Pericolosità sismica di base: valori di PGA al suolo rigido (10% di probabilità di superamento in 50 anni) secondo la OPCM 3519/2006.

La DAL 112/2007 indica anche tre accelerogrammi di riferimento per le modellazioni numeriche di risposta sismica locale (analisi di “terzo livello”): si tratta di input selezionati dalla Banca dati ISESD attraverso una procedura che ha valutato la similarità tra la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei singoli segnali. È così possibile ricavare lo spettro di risposta e gli accelerogrammi di riferimento per ogni Comune riscaldando lo spettro normalizzato di figura 2.8 con la relativa PGA di riferimento al suolo rigido.



**Figura 2.8** – Spettro di risposta normalizzato impiegato per la selezione dalla banca dati accelerometrica ISESD dei segnali di riferimento regionale.

#### 2.4.2 La pericolosità preliminare elaborata per il PSC

L'Unione dei Comuni della Romagna Faentina già dispone di uno studio di pericolosità sismica di primo e secondo livello, a corredo del Quadro Conoscitivo per il Piano Strutturale Comunale (PSC) in forma associata.

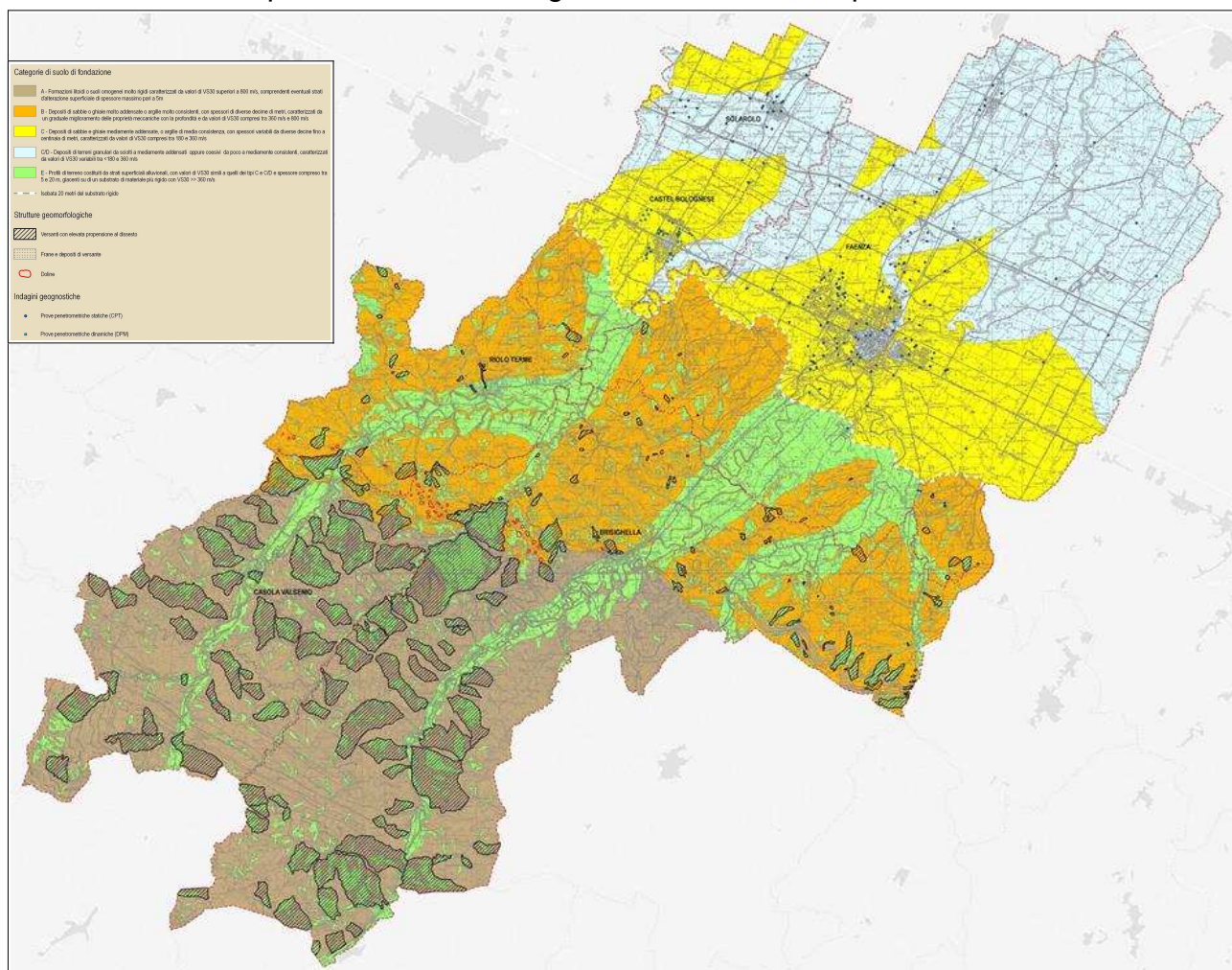
Lo studio, elaborato nel 2009 da un gruppo di lavoro che comprendeva il dr. Geol. Stefano Marabini e il coordinamento del SGSS regionale, si è basato sugli esiti delle indagini geognostiche disponibili all'epoca del lavoro. Lo studio del 2009 rappresenta uno dei primi lavori di microzonazione sismica territoriale dell'Emilia-Romagna elaborati in ossequio alla DAL n. 112/2007 (Marabini, 2009) e ha consentito:

- di produrre una preliminare cartografia che individua le aree suscettibili di effetti locali (primo livello di approfondimento). Questa mappa, pur rispondendo parzialmente ai criteri di analisi di primo livello dettati nelle linee guida regionali (si tratta di un'analisi a scala più vasta – 1:50.000 – e priva di approfondimenti alla scala comunale o subcomunale), ha di fatto rappresentato una prima base per le ulteriori indagini di approfondimento per la microzonazione sismica (figura 2.9);
- di effettuare ulteriori indagini geognostiche e geofisiche mirate alla caratterizzazione

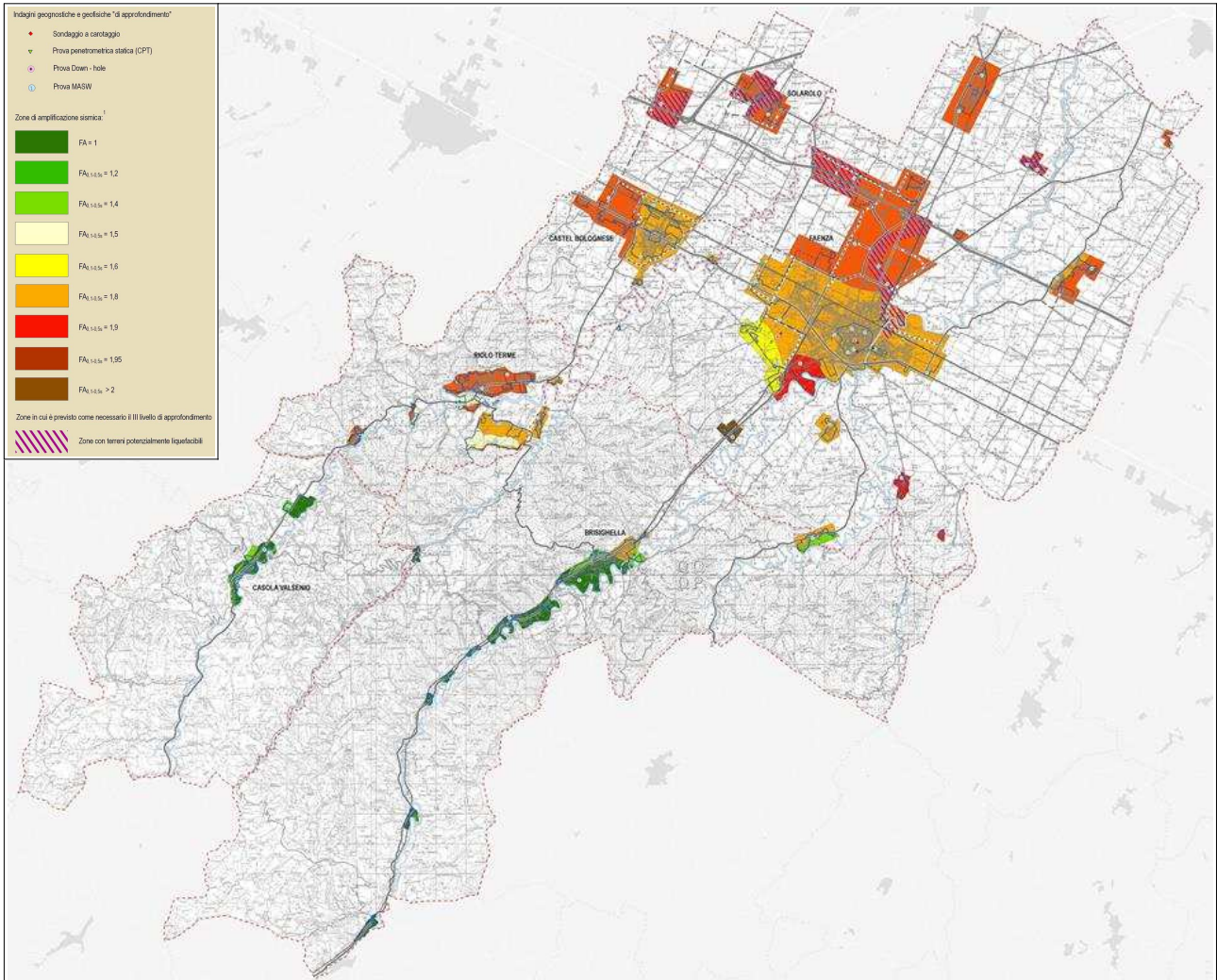
sismica dei comuni interessati (sondaggi a carotaggio continuo; penetrometrie; stendimenti MASW; prove in foro “Down-Hole”);

- di redigere la cartografia di microzonazione sismica degli ambiti urbani (secondo livello di approfondimento) consolidati e di potenziale espansione. La microzonazione sismica si è basata sui criteri di stima dei fattori di amplificazione attraverso l'utilizzo di tabelle e formule riportate nella DAL n. 112/2007 e in funzione degli esiti di caratterizzazione geognostica e geofisica del territorio studiato.

I risultati della microzonazione sismica sono stati sintetizzati in mappe di dettaglio (scala 1:10.000) che individuano zone a differente pericolosità sismica e forniscono indicazioni relative alla maggiore o minore pericolosità in termini di fattori di amplificazione sismica (figura 2.10). All'epoca dello studio, si è convenuto di considerare come fattore di amplificazione rappresentativo del territorio studiato il solo rapporto di Intensità Spettrale di Housner (SI) per un intervallo di periodi compreso tra 0,1 e 0,5 secondi (per un TR pari a 475 anni e smorzamento 5%), in quanto in questo intervallo è compresa oltre il 90% degli edifici esistenti o di previsione.



**Figura 2.9** – Stralcio della Carta della Pericolosità Sismica Locale alla scala 1:50.000 (Marabini, 2009).

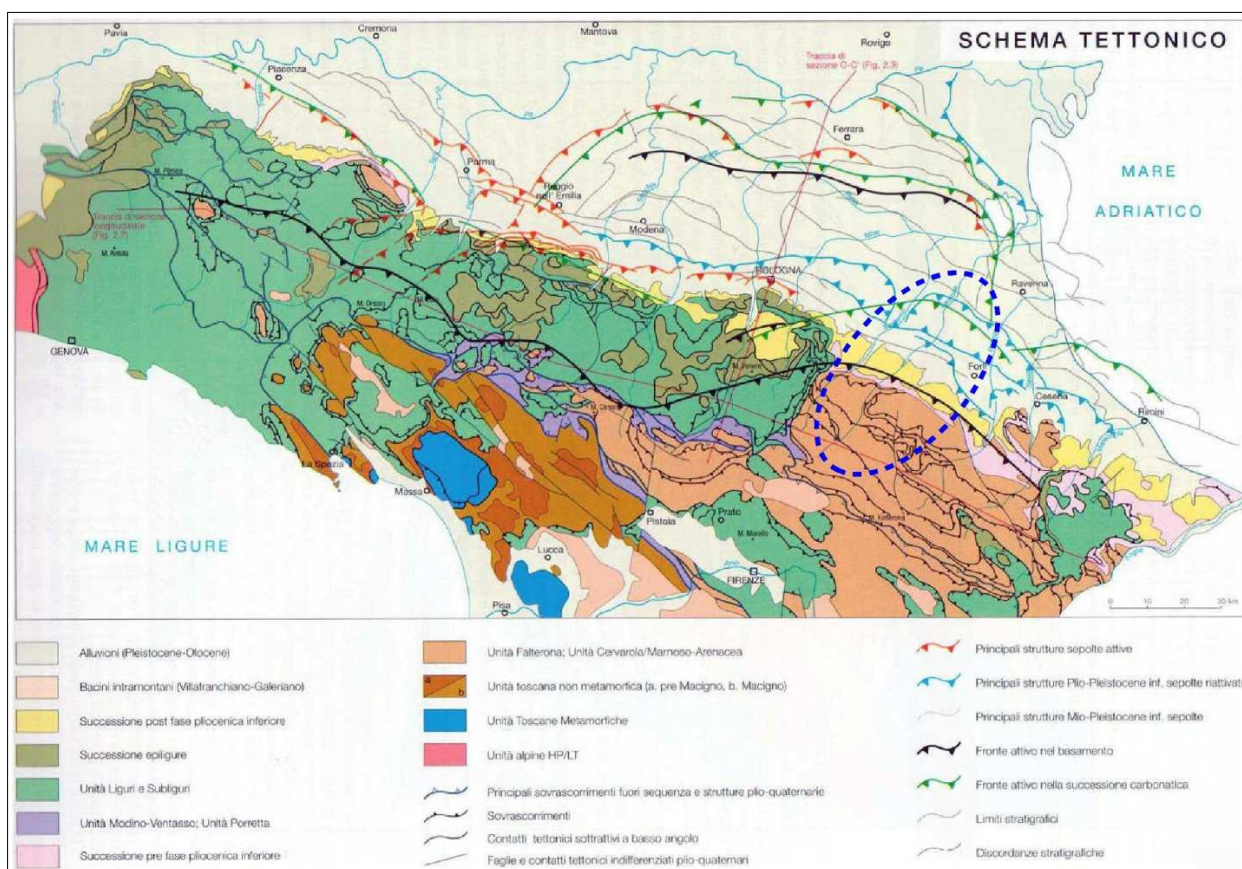


**Figura 2.10** - Stralcio della Carta di Sintesi Territoriale della Microzonazione Sismica alla scala 1:50.000 (Marabini, 2009).

### 3 ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

#### 3.1 Inquadramento geologico strutturale

Dal punto di vista geologico strutturale il territorio complessivo dell'Unione della Romagna Faentina si estende fino a includere zone di “catena” appenninica e di “marginie” appenninico sepolto, ovvero fino quasi al fronte delle “Pieghie Romagnole” (Pieri & Groppi, 1981). Si rammenta che la zona in cui la pianura termina contro i primi declivi appenninici non rappresenta l’inizio della “catena”: infatti all’Appennino morfologico, visibile, segue in pianura un “Appennino in embrione” sepolto sotto i depositi alluvionali padani (PTF di Boccaletti et al., 1985; 2004). In figura 3.1 è inquadrato il contesto tettonico locale che identifica i rapporti tra catena e pianura nel territorio di interesse.



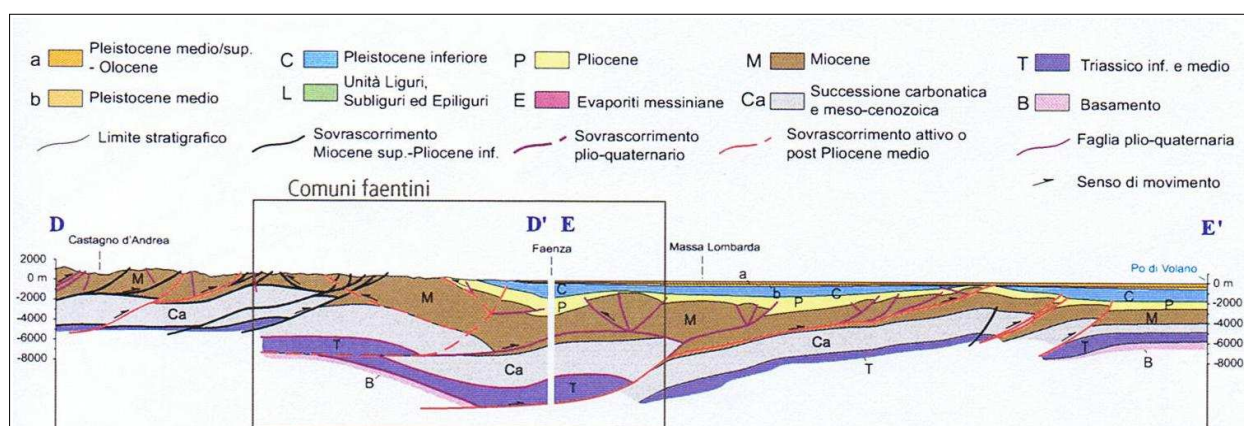
**Figura 3.1.** Schema tettonico dell'Emilia-Romagna. Il territorio dell'Unione della Romagna Faentina è compreso nel cerchiato blu (Boccaletti et al., 2004).

Nella zona di catena appenninica, affiorano unità che non hanno subito importanti traslazioni e considerate “alloctone”, appartenenti al dominio romagnolo (parte alta della Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola ed evaporiti messiniane) e al dominio padano (successione post-evaporitica del margine padano-adriatico). Dal punto di vista strutturale le formazioni rocciose affioranti e subaffioranti immergono con assetto

prevalentemente a monoclinale verso NNE, con strutture principali riconducibili a “thrust” nord/nord-est vergenti (attivi nel Pliocene e nella parte bassa del Pleistocene) e “back-thrust” quaternari con vergenza sud/sud-ovest (Cerrina Feroni et al., 2002, Boccaletti et al., 2004).

Le strutture affioranti “appenniniche”, con direzione parallela all’asse della catena appenninica, si sono formate durante le fasi orogenetiche del Pliocene e del Pleistocene inferiore (Cerrina Feroni et al., 2002). Esse sono particolarmente concentrate nelle evaporiti messiniane, grazie al comportamento duttile del gesso che ha evidentemente assunto la funzione di superficie di deformazione preferenziale. Sono inoltre diffuse le strutture affioranti a direzione “antiappenninica” di età più recente, a componente trascorrente, che interessano tanto i terreni miocenici e pliocenici che quelli pleistocenici. In corrispondenza di queste ultime strutture si sono impostati i principali corsi d’acqua.

La figura 3.2 offre uno schema di profilo trasversale dell’Appennino e del suo margine che interessa il Faentino.



**Figura 3.2** - Sezione geologico strutturale dell’area Faentina, attraverso l’Appennino e la Pianura Padana elaborata da Boccaletti et al. (2004).

E’ stato ipotizzato che l’ultima fase tettonica di significativa intensità sia cronologicamente collocabile alla fine del Pleistocene medio. I primi depositi indeformati e in discordanza su recenti deformati, sono le alluvioni del Subsistema di Villa Verucchio (AES7) del Pleistocene superiore (125-18 ka). Tuttavia non sono state escluse anche deformazioni più recenti.

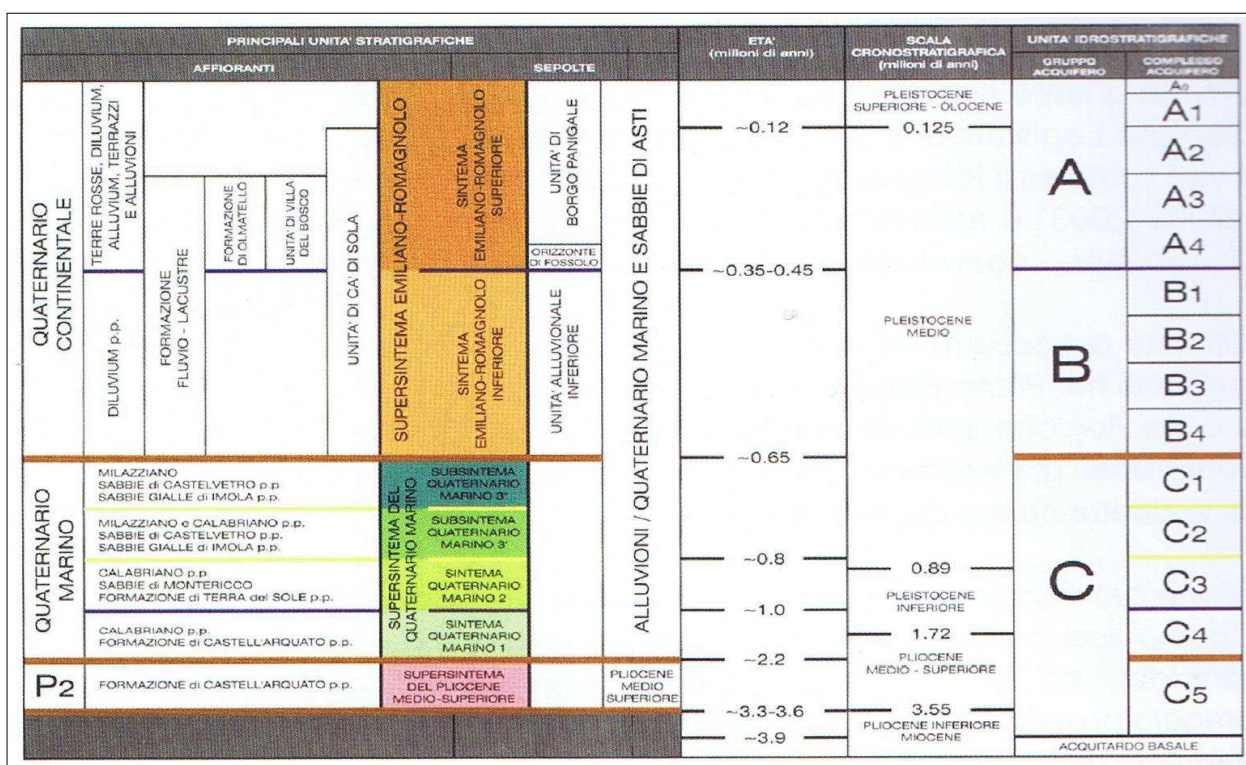
### 3.2 Substrato geologico marino e depositi quaternari

Si riportano i principali elementi caratterizzanti delle unità deposizionali (marine e continentali) presenti nel territorio dell’Unione della Romagna Faentina. La base conoscitiva litostratigrafica e strutturale locale è rappresentata dalla Carta Geologica dell’Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, consultabile anche on-line nel sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. Un ulteriore riferimento per

questo lavoro, è rappresentato anche dalla Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (ISPRA et al. 2009a e 2009b).

Per i depositi alluvionali, si distinguono le unità affioranti e quelle sepolte, a formare i settori di conoide del Lamone e Senio (marginalmente, anche del Santerno), della pianura di interconoide e di quella più esterna.

Occorre anche rammentare che la più recente cartografia geologica regionale e nazionale distingue le coperture alluvionali comprese in AES secondo la convenzionale classificazione stratigrafica sequenziale (cicli deposizionali), comprese nel principale "Supersintema Emiliano-Romagnolo" (Regione Emilia-Romagna, 1998). I depositi alluvionali attribuiti AES sono suddivisi in quattro principali sequenze deposizionali di diverso ordine gerarchico (subsintemi identificati con sigle da AES5 – più antichi - ad AES8 – più recenti).



**Figura 3.3** - Schema stratigrafico del margine appenninico e della pianura emiliano-romagnola (modif. da Regione Emilia-Romagna, 1998). Sono evidenziati anche i rapporti tra unità deposizionali di pianura e i principali acquiferi.

La figura 3.3 propone lo schema dei rapporti stratigrafici del margine appenninico e della pianura, basata sulla citata classificazione delle unità deposizionali alluvionali e il sottostante substrato geologico marino che costituisce il margine affiorante e sepolto della catena appenninica.

Le unità affioranti nel settore appenninico, come già detto, appartengono alla Successione



Umbro-Marchigiano-Romagnola, alla successione evaporitica messiniana e alla Successione post-evaporitica del margine padano-adriatico. L'età delle formazioni affioranti è più giovane procedendo da sud-ovest verso nord-est: dalle unità marine antiche, di età compresa tra il Miocene medio-superiore (Formazione Marnosa-Arenacea) e il Pleistocene medio (Sabbie di Imola), si passa ai depositi alluvionali del Supersistema Emiliano-Romagnolo (Pleistocene medio-Attuale), distribuiti lungo i settori intravallivi, allo sbocco delle valli e nell'antistante pianura.

### 3.3 Successioni marine affioranti

#### *Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola*

L'unità stratigrafica affiorante più antica è la Formazione Marnoso-Arenacea (FMA) costituita da torbiditi di avanfossa (Tortoniano). Si tratta di alternanze arenaceo-pelitiche con intervalli di marne emipelagiche risedimentate in un bacino di avanfossa attivo tra il Burdigalliano e il Tortoniano, interessato da una forte tettonica sin-sedimentaria, che riceveva materiale da diverse aree sorgente poste al paleomargine alpino e appenninico.

Segue la Formazione di Ghioli di Letto (GHL), unità di ambiente batiale, che segna il passaggio al Messiniano e alla crisi di salinità. Essa è costituita da peliti grigie, brune bituminose e biosiltiti a diatomee, fittamente laminate depositate in ambiente marino soggetto a variazioni di ossigenazione e a fasi di anossia.

#### *Gruppo della Gessoso Solfifera*

La successiva crisi di salinità ha portato all'instaurarsi di ambienti di 'sabka' e alla deposizione della Formazione della Vena del Gesso (VGS). Si tratta di gesso selenitico, e microcristallino, gessoarineti, gessoruditi e subordinati peliti e calcari, depositati in ambiente evaporitico di laguna in contesto tettonicamente attivo (come evidenziato dalla presenza di detriti gessosi). Questa unità rappresenta un contrafforte continuo tra il Torrente Sellustra e il Fiume Lamone lungo oltre 22 km interrotto per un breve tratto da dislocazioni tettoniche a sud-est di Brisighella.

Successivamente alla crisi di salinità, si sono instaurate condizioni di lago-mare e laguna che hanno portato alla deposizione della Formazione a Colombacci (FCO): argille e argille marnose grigio verdi contenenti sottilissime alternanze siltose o sabbiose. In questa zona mancano i livelli a calcari micritici grigio-chiari (colombacci) che danno il nome alla formazione. La formazione è stata attribuita alla parte terminale del Messiniano (Krijnsman et al., 1999).

#### *Successione post-evaporitica del margine padano-adriatico*

Un contatto paraconcordante separa la FCO da unità di piattaforma e scarpata continentale del Pliocene inferiore, le Marne di Cella (CEA), e del Pliocene inferiore-

Pleistocene inferiore, le Argille Azzurre (FAA). Per la durata di tutto il Pliocene si mantengono condizioni di sedimentazione bacinale, nel Pliocene medio localmente si instaurano condizioni euxiniche. Con il Pleistocene inferiore si osserva un passaggio ad ambienti litorali. Le CEA sono marne e marne argillose grigio chiaro di ambiente ben ossigenato di piattaforma prossima alla scarpata continentale. Le FAA sono argille e argille marnose grigio-azzurre con rari strati arenacei. L'ambiente di sedimentazione è di scarpata continentale e piattaforma continentale esterna. Le FAA sono affioranti nella zona in esame in forme calanchive.

Nelle colline prossime all'abitato di Castelbolognese affiorano le Arenarie e le Argille di Savignano (SVG); si tratta di una formazione spessa pochi metri composta da sabbie siltose, silt e sabbie passanti a sabbie con laminazione da onda e locali concentrazioni di macrofossili. L'ambiente di deposizione della parte basale è quello lagunare che passa rapidamente verso l'alto a condizioni paraliche. L'età del deposito è attribuibile alla parte terminale del Pleistocene inferiore, Siciliano (Amorosi et al., 1998b).

Le unità marine più alte e più recenti del margine appenninico sono le Sabbie di Imola (IMO). Per quanto riguarda la zona in esame, esse affiorano sulle colline prossime a Castelbolognese e poggiano con contatto discordante ed erosivo sulla FAA (Amorosi et al., 1998a). Le IMO sono cronologicamente attribuibili alla parte inferiore del Pleistocene medio (Ioniano; Amorosi et al., 1998a); sono costituite da sabbie gialle e ghiaie di spiaggia e subordinatamente da peliti di piana alluvionale e laguna.

### **3.4 Coperture alluvionali quaternarie**

La successione marina è troncata al tetto da depositi ghiaiosi e sabbiosi alluvionali del Supersistema Emiliano-Romagnolo (Pleistocene medio – Olocene), corrispondenti al ciclo Qc di Ricci Lucchi et al. (1982; Pleistocene medio-Olocene).

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è un'unità stratigrafica costituita da depositi quaternari continentali affioranti nei settori intravallivi, al margine appenninico padano e in corrispondenza della Pianura Padana. Essi sono correlabili nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola con depositi alluvionali, deltizi, litorali e marini organizzati in successioni cicliche. Il Supersistema Emiliano-Romagnolo comprende un Sistema Emiliano Romagnolo inferiore (AEI, Pleistocene medio) e un Sistema Emiliano Romagnolo superiore (AES). I depositi di AEI sono stati individuati esclusivamente nel sottosuolo della pianura. Nella zona in esame affiorano solo i depositi di AES.

Lo spessore del Sistema Emiliano-Romagnolo superiore varia da poche decine di metri in prossimità del margine appenninico a un massimo di 210 m nel sottosuolo di Borgo Cotignola. Nei settori intravallivi e di margine appenninico, l'unità AES ha uno spessore di alcuni metri ed è costituita da depositi terrazzati di piana alluvionale intravalliva che poggiano in discordanza su depositi marini antichi o su AEI. Si tratta di ghiaie e sabbie di

conoide e di canale fluviale e argille, limi di piana inondabile. I lembi di successione affioranti nei tratti intravallivi appartengono a un intervallo temporale molto ampio che si estende dal Pleistocene medio all'Attuale e mostrano una ridotta variabilità litologica e di facies. Si tratta infatti di prevalenti ghiaie di terrazzo alluvionale. Al contrario i depositi in pianura sono attribuibili prevalentemente all'Olocene e presentano maggiore variabilità di facies (di ambiente alluvionale). Si riportano di seguito le facies osservate e la rispettiva distribuzione:

- le *facies ghiaiose* affiorano nei settori più interni (aree di terrazzo fluviale, conoidi alluvionali e allo sbocco delle aste fluviali), mentre sono ben sviluppate nel sottosuolo: organizzate in corpi amalgamati nastriformi e tabulari (riempimenti di canale) oppure in complessi coalescenti (conoide);
- le *facies sabbiose e limose di canale, argine e rotta fluviale* affiorano in terrazzi intravallivi, lungo l'asse delle valli e nel settore di pianura in prossimità dei corsi fluviali;
- i *Limi e le argille di piana inondabile* sono stati riscontrate anche in corrispondenza dei terrazzi fluviali, ma tendono a essere maggiormente sviluppate, in termini di spessore ed estensione areale, nelle zone di pianura nei settori laterali alle aste fluviali.

AES è a sua volta suddivisa in subsintemi: unità di rango inferiore riconosciute in particolare nelle zone intravallive e che sono risultate correlabili su più aste fluviali. Nei settori interfluviali (settori di margine appenninico compresi tra aste fluviali contigue), dove le scarpate di erosione fluviale non sono facilmente riconoscibili, i terreni sono in alcuni casi genericamente attribuiti all'unità AES.

I vari subsintemi presentano una geometria cuneiforme con spessori che variano, come già accennato, da pochi metri nei settori montani a decine di metri verso il limite con la pianura. La base di questi terreni è generalmente inconforme su depositi marini antichi, mentre il limite superiore corrisponde alla superficie topografica.

Nella zona oggetto di studio sono stati distinti i seguenti subsintemi, dal più antico alla più recente età deposizionale (per la descrizione di dettaglio si rimanda alle note illustrative del progetto CARG - Fogli 238-289):

- Subsistema di Liano (AES4). Questa unità, ove affiorante, forma terrazzi con età attribuibile al Pleistocene medio e, per quel che riguarda la zona oggetto di studio, essi sono stati cartografati in destra e sinistra idrografica del Fiume Lamone;
- Subsistema di Torre Stagni (AES5). Questi sedimenti, quando affioranti, costituiscono terrazzi del Pleistocene medio e sono stati identificati lungo gli spartiacque tra il torrente Senio e il Fiume Lamone e tra Lamone e torrente

Marzeno;

- Subsintema di Bazzano (AES6). Questa unità costituisce spessori significativi di sedimenti alluvionali terrazzati affioranti (osservati in particolare lungo le valli del Senio e del Lamone) che testimoniano una fase di aggradazione fluviale prolungata correlabile a un episodio trasgressivo presumibilmente riferibile al Tirreniano (parte alta del Pleistocene medio). Nella zona oggetto di studio, AES6 affiora allo sbocco delle valli del Senio e del Lamone, in pianura non è affiorante perché è erosa o sepolta dal successivo Subsintema di Villa Verucchio;
- Subsintema di Villa Verucchio (AES7). Questi terreni affiorano a quote topografiche modeste sotto forma di terrazzi intravallivi e allo sbocco delle valli. Il centro dell'abitato di Casola Valsenio, ad esempio, è impostato su un largo terrazzo attribuibile a tale subsintema. Nel tratto della valle del Senio compreso tra Borgo Rivola e Cuffiano, il terrazzo AES7 è ben sviluppato sulla destra idrografica del torrente e si estende anche lungo la valle del Sintria. Da Brisighella fino a Faenza, AES7 è continuo su entrambi i fianchi della valle del Lamone. L'età di tale subsintema è stata attribuita al Pleistocene superiore;
- Subsintema di Ravenna (AES8). Questo subsintema rappresenta l'elemento sommitale di AES. Il tetto di tale unità coincide in parte con la superficie topografica e, in alcune zone, con la base di una unità di rango inferiore denominata Unità di Modena (AES8a). AES8 affiora in fasce strette prossime alle aste fluviali intravallive e su aree progressivamente più ampie allo sbocco delle valli verso la pianura. Ad esso è stata attribuita un'età compresa tra il Pleistocene superiore e l'Attuale;
- Unità di Modena (AES8a). Si tratta di terreni che poggiano con una superficie inconforme sulla AES8, formati da sedimenti alluvionali molto recenti di epoca post-romana caratterizzati da morfologie deposizionali originarie (IV-VI sec. d.C.-Attuale). La deposizione di AES8a segna l'instaurarsi di una fase di deterioramento climatico avvenuta tra il IV-VI sec. d.C. che ha portato l'alluvionamento di gran parte della pianura (Veggiani, 1994). AES8a affiora solo nei settori corrispondenti agli assi degli attuali canali.

### 3.5 Aspetti geomorfologici

Per quanto riguarda gli aspetti più propriamente geomorfologici, lo studio di microzonazione sismica si è riferito alle analisi territoriali riportate nel Quadro Conoscitivo del PSC dei Comuni dell'Unione della Romagna Faentina. La figura 3.4 propone la cartografia geomorfologica di sintesi del territorio dell'Unione (S. Marabini & A. Poggiali, 2006).

Si rammenta che per le aree di pendio della porzione montana, collinare e per il settore di

fondovalle, la cartografia è essenzialmente derivata dalla Cartografia Geologica in formato digitale, fornita dal SGSS della Regione Emilia Romagna. Per l'area di pianura, invece, la carta geomorfologica elaborata per il PSC è stata originalmente costruita sulla base di un microrilievo della superficie naturale prodotto tramite informatizzazione di migliaia di punti quotati selezionati sulla Cartografia CTR. In tal modo, sono state distinte originalmente le principali unità morfologiche alluvionali, quali paleodossi, dossi attuali, aree di interdosso, etc. In sintesi, la carta geomorfologica di sintesi del territorio dell'Unione riporta i seguenti elementi geomorfologici principali:

- frane attive → depositi gravitativi con evidenze di movimenti in atto o recenti, costituiti da litotipi eterogenei, raramente monogenici, ed eterometrici, più o meno caotici (la tessitura dei depositi è condizionata dalla litologia del substrato e dal tipo di movimento prevalente). La maggior parte di questi è di tipo complesso ed è il risultato di più tipi di movimento sovrapposti nello spazio e nel tempo (tipicamente scorrimenti/colamenti). La tessitura prevalente risulta costituita da clasti di dimensioni variabili immersi in una abbondante matrice pelitica e/o sabbiosa;
- frane quiescenti o stabilizzate: depositi gravitativi senza evidenze di movimenti in atto o recenti, ma in condizioni di possibile riattivazione (quiescenti), oppure in situazioni in cui le potenziali cause di innesco o di riattivazione si sono esaurite a causa del modellamento morfologico (stabilizzate – es. paleofrane);

- depositi di versante, comprendenti:

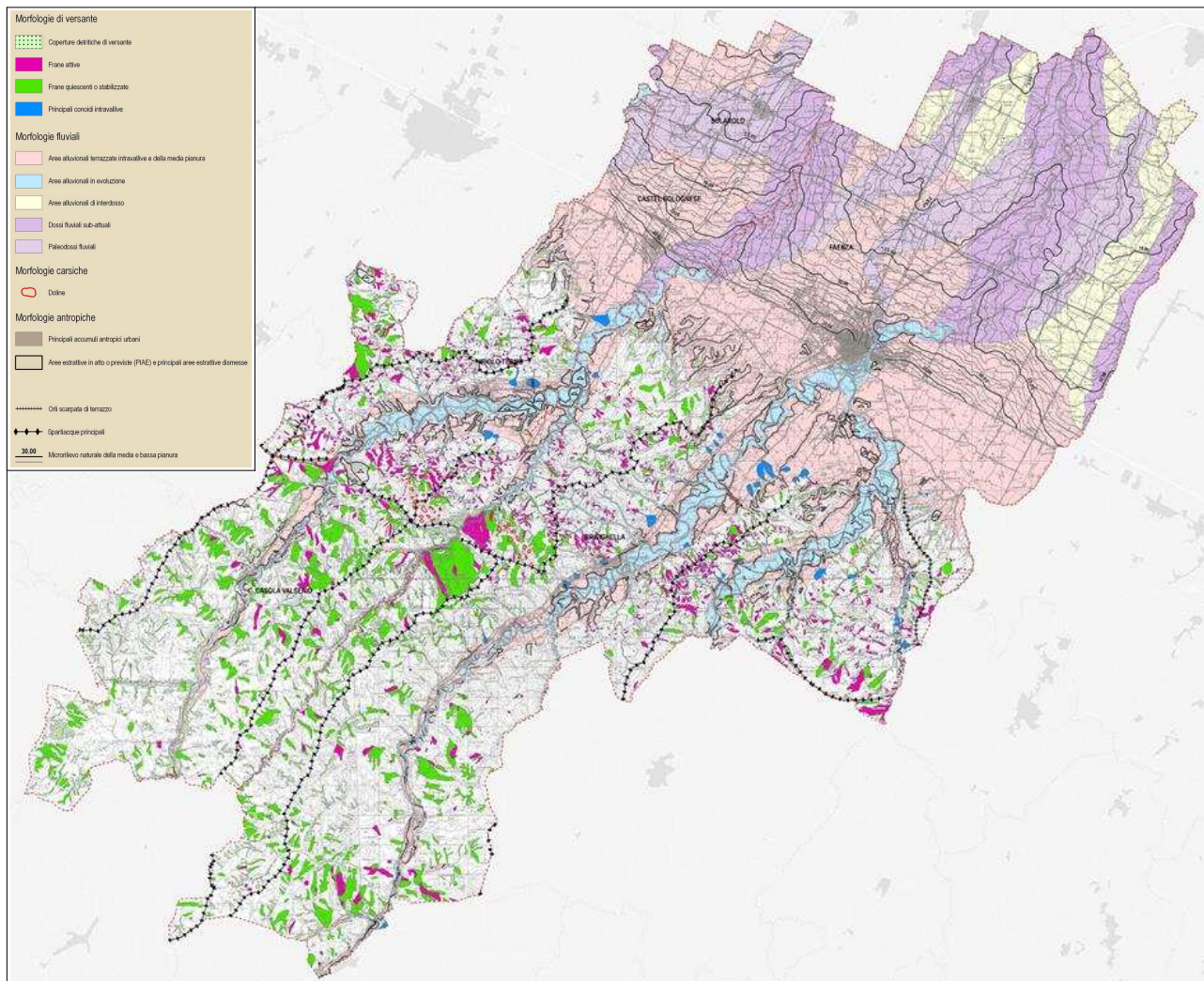
*deposito di versante s.l.* → costituiti da litotipi eterogenei ed eterometrici più o meno caotici. Frequentemente l'accumulo si presenta con una tessitura costituita da clasti di dimensioni variabili immersi e sostenuti da una matrice pelitica e/o sabbiosa (che può essere alterata per ossidazione e pedogenesi), a luoghi stratificato e/o cementato. La genesi può essere dubitativamente gravitativa, da ruscellamento superficiale e/o da soliflusso;

*deposito eluvio-colluviale* → coltre di materiale detritico, generalmente fine (sabbie, limi e peliti) prodotto da alterazione "in situ" o selezionato dall'azione mista delle acque di ruscellamento e della gravità, con a luoghi clasti a spigoli vivi o leggermente arrotondati;

*detrito di falda* → accumulo detritico costituito da materiale eterogeneo ed eterometrico, generalmente a quote elevate o molto elevate, con frammenti litoidi di dimensioni variabili tra qualche cm<sup>3</sup> e decine di m<sup>3</sup>, privo di matrice o in matrice sabbioso-pelitica alterata e pedogenizzata, di origine gravitativa frequentemente alla base di scarpate e lungo i versanti più acclivi;

- depositi di conoide intravallive → costituite da depositi alluvionali, da ghiaiosi a fini, a forma di ventaglio aperto verso valle, in corrispondenza dello sbocco di valli e

vallecole trasversali ai corsi d'acqua principali ove la diminuzione di pendenza provoca la sedimentazione del materiale trasportato dall'acqua. Essi sono soggetti ad evoluzione dovuta alla dinamica torrentizia o attualmente non soggetti ad evoluzione;



**Figura 3.4** – Stralcio della Carta Geomorfológica alla scala 1:50.000 (da: Quadro Conoscitivo PSC Unione della Romagna Faentina, 2009).

- doline → depressioni morfologiche di aspetto imbutiforme, prodotte dalla dissoluzione della roccia solubile ad opera delle acque di precipitazione meteorica;
- morfologie fluviali così distinte:

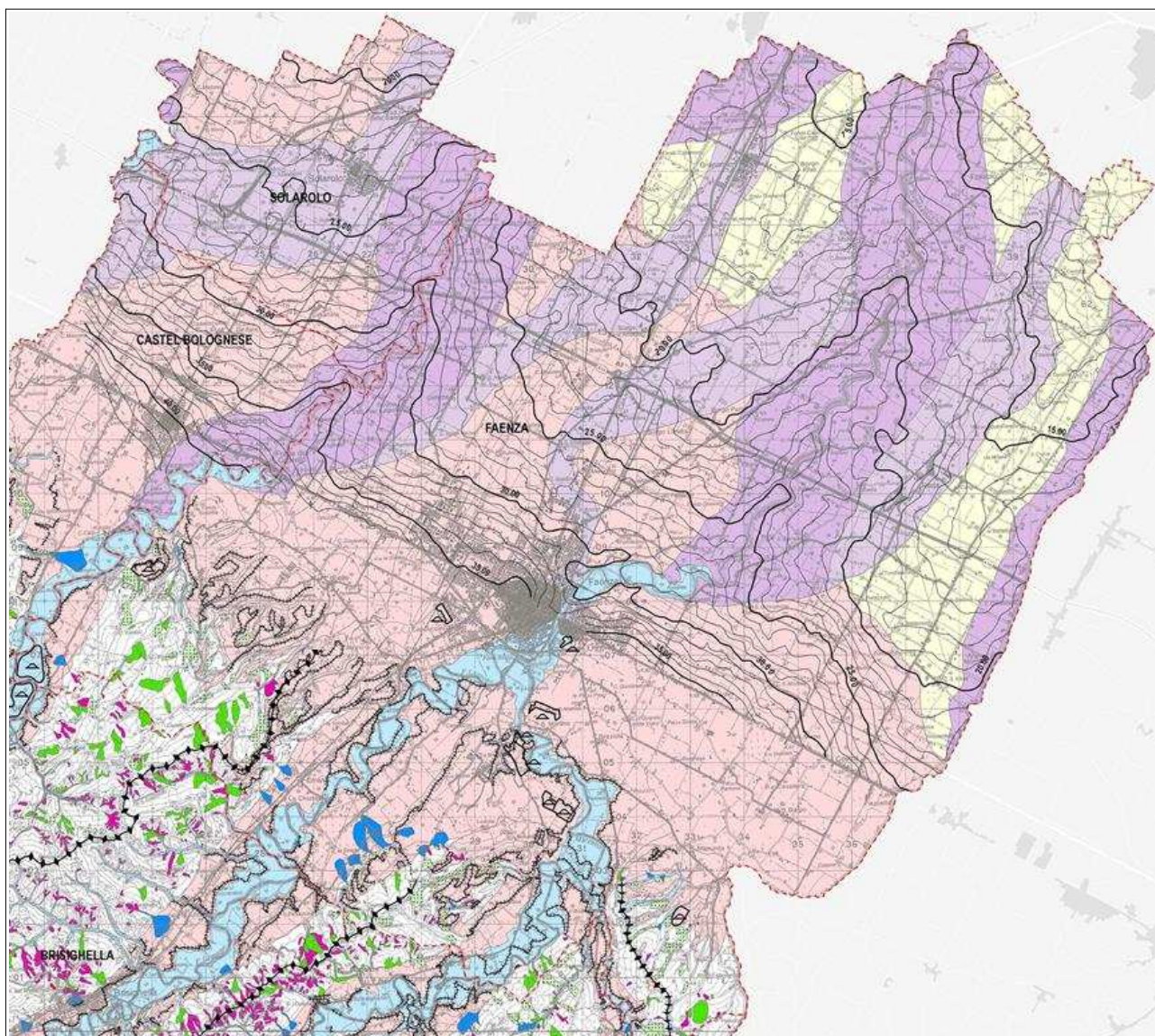
le piane più o meno attive di fondo valle prossime agli alvei, costituite dai depositi in evoluzione e dalle superfici idrogeologicamente connesse con l'alveo stesso (aree golenali ed ex-golenali);

le superfici alluvionali terrazzate del settore vallivo, dell'alta pianura e di un ambito della media pianura, cartografate con la medesima campitura in quanto

accumunate dal fatto di essere costituite da depositi non attivi;

le unità morfostratigrafiche recenti della bassa pianura, la cui morfologia è evidenziata dal loro microrilievo naturale, le quali sono state distinte in “paleodossi fluviali” (ovvero argini naturali di tracciati fluviali estinti), “dossi fluviali attuali” (ovvero argini naturali costruiti dai corsi d’acqua attuali prima della loro arginatura artificiale (a partire dal XVIII secolo) e “aree di interdosso”.

La figura 3.5 riporta uno stralcio di maggior dettaglio della carta geomorfologica per quanto riguarda il territorio comunale di Castel Bolognese, Faenza e Solarolo.



**Figura 3.5** – Stralcio di maggior dettaglio della Carta Geomorfologica alla scala 1:50.000: territorio comunale di Castel Bolognese, Faenza e Solarolo, (da Quadro Conoscitivo PSC Unione della Romagna Faentina, 2009).

## 4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

### 4.1 Dati pregressi

Lo studio di microzonazione ha consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio. In questo senso, si è potuto disporre di un buon numero di prove che sono state raccolte e archiviate dalla Regione Emilia-Romagna e dai Comuni e in particolare:

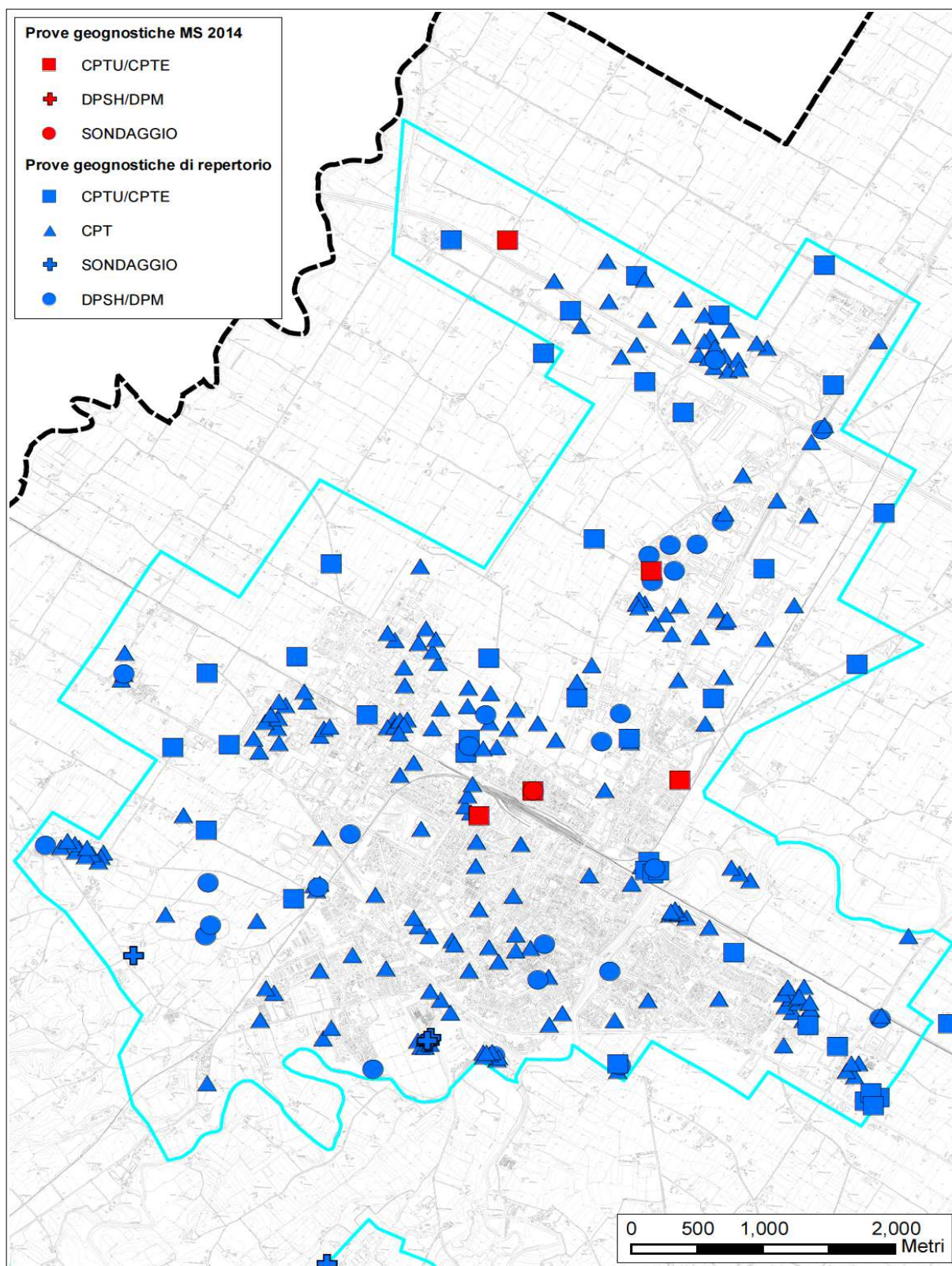
- sezioni geologiche e prove disponibili nella Banca Dati Geognostica della Regione Emilia-Romagna, pubblicate e consultabili anche nel sito internet del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS) regionale;
- prove geognostiche e geofisiche di repertorio fornite dalle Amministrazioni comunali, relative a indagini geologiche archiviate presso gli Uffici Tecnici e svolte nel territorio comunale per gli interventi più significativi di pianificazione (es: Piano Strutturale Comunale; Varianti specifiche al PSC; Piani Particolareggiati pubblici e/o privati; ecc.).

Si è reso indispensabile effettuare un'accurata selezione delle numerose prove di repertorio, in quanto molte indagini sono state eseguite con attrezzature ormai da considerarsi fuori "standard" (con esiti inutilizzabili o difficilmente interpretabili), oppure altre prove sono risultate troppo superficiali per poter essere pienamente usate per gli scopi del presente lavoro. In conclusione, i dati utilizzati sono quelli delle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo, le CPT, CPTE/U, DPM e DPSH spinte fino a profondità maggiori di 6 metri e indagini geofisiche ("Down-Hole", "Coni sismici", stendimenti ReMi e MASW, registrazioni HVSR). Il totale delle prove pregresse selezionate e implementate nel database che costituisce l'archivio delle indagini per il Comune di Faenza, risulta pari a 373 prove, così distinte per tipologia:

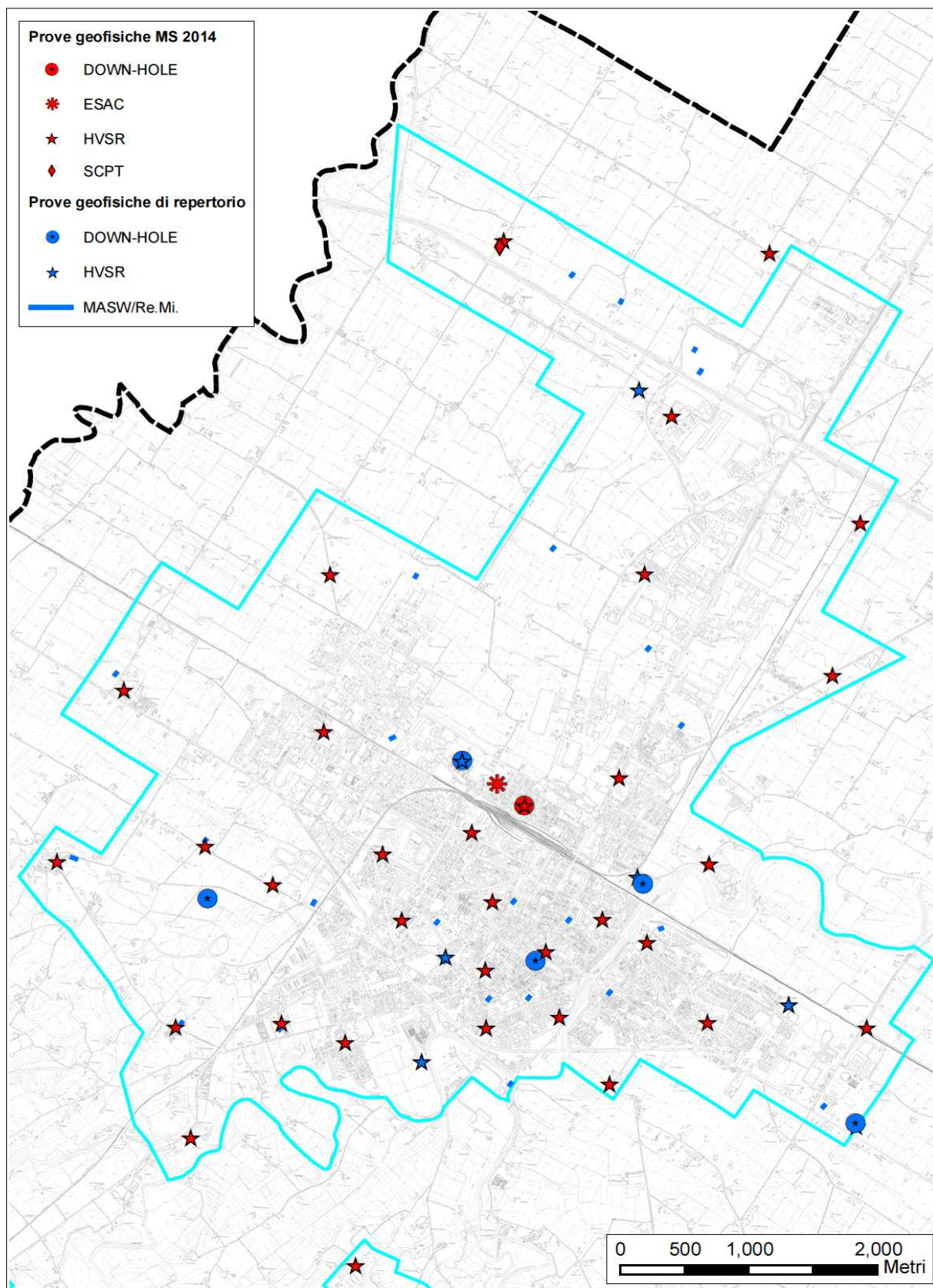
- n. 32 carotaggi continui (S e SS) di cui cinque comprendono il recupero di campioni (si hanno quindi analisi geotecniche effettuate in laboratorio "terre");
- n. 1 pozzo per acqua (PA);
- n. 1 pozzo per idrocarburi (PI);
- n. 227 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT);
- n. 21 prove penetrometriche con punta elettrica (CPTE);
- n. 26 prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono (CPTU);
- n. 6 prove penetrometriche dinamiche leggere (DL);
- n. 5 prove penetrometriche dinamiche medie (DN);



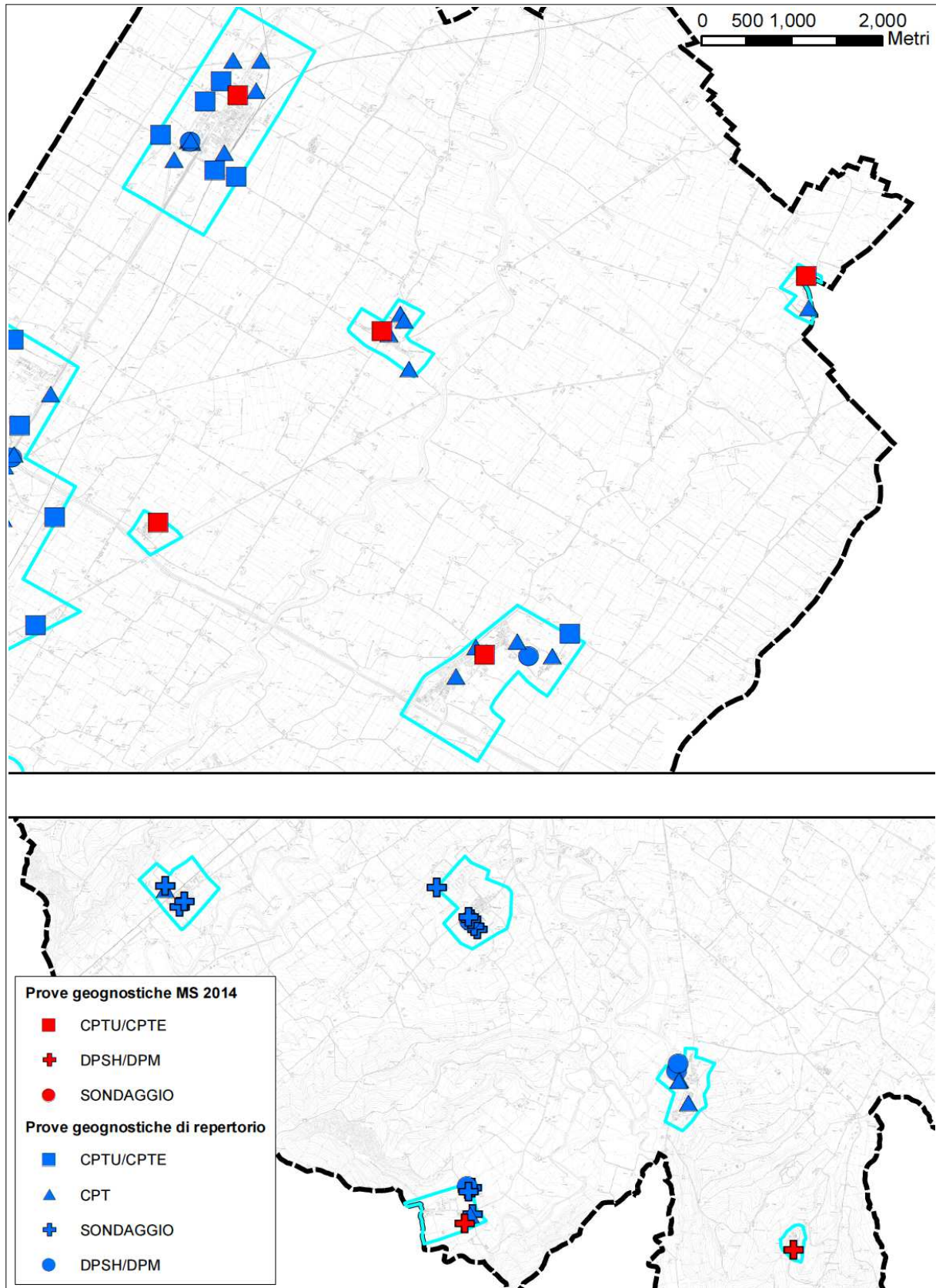
- n. 4 prove penetrometriche dinamiche super-pesanti (DS);



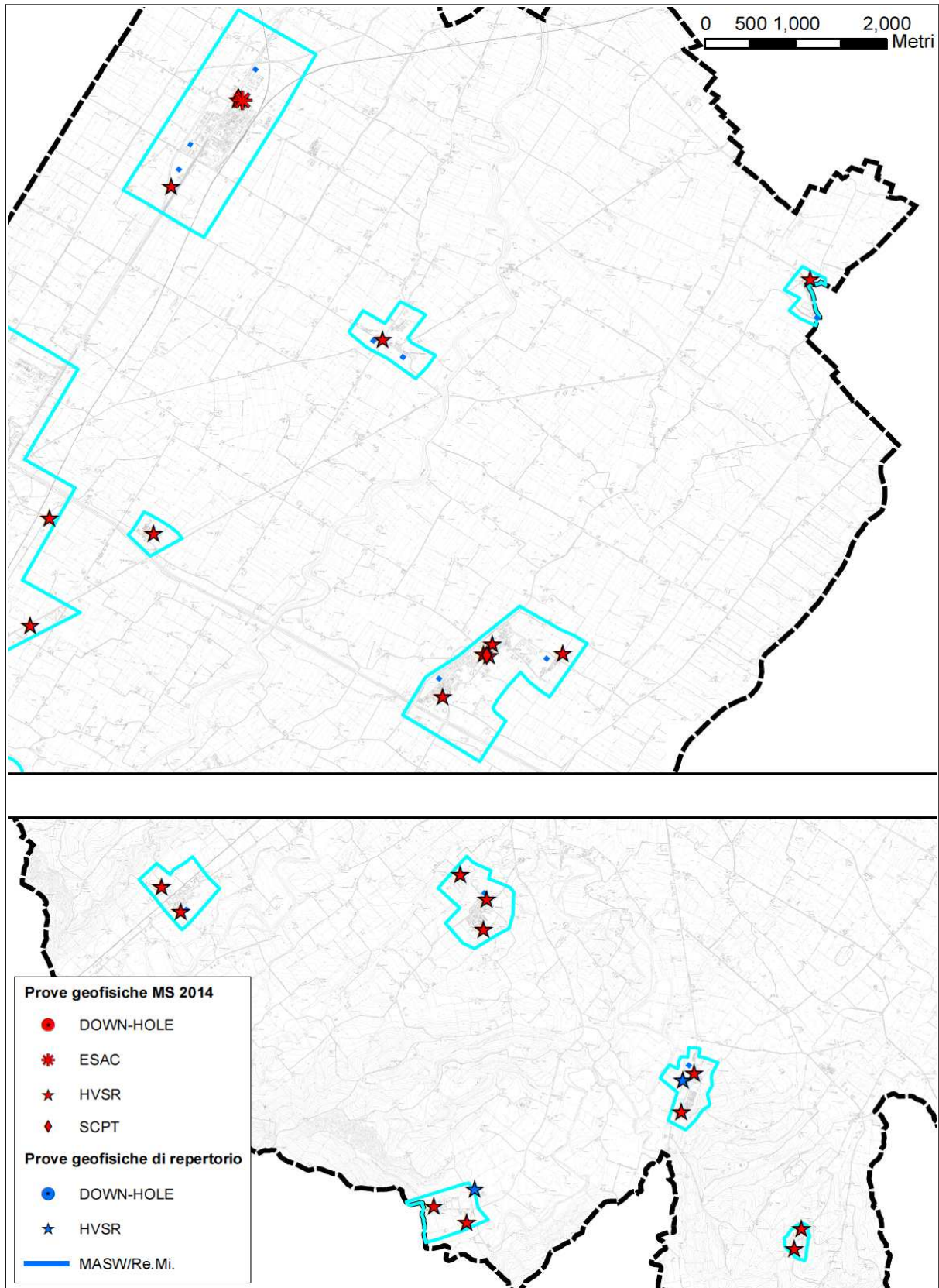
**Figura 4.1** – Localizzazione delle indagini geognostiche pregresse e integrative per lo studio di microzonazione sismica nell'area Capoluogo.



**Figura 4.2** – Localizzazione delle indagini geofisiche pregresse e integrative per lo studio di microzonazione sismica nell'area Capoluogo.



**Figura 4.3** – Localizzazione delle indagini geognostiche pregresse e integrative per lo studio di microzonazione sismica nelle frazioni.



**Figura 4.4** – Localizzazione delle indagini geofisiche pregresse e integrative per lo studio di microzonazione sismica nelle frazioni.

- n. 3 prove sismiche in foro tipo “Down-Hole” (DH);
- n. 9 misure di microtremori a stazione singola (HVSR);
- n. 1 stendimento sismico passivo ReMi;
- n. 37 stendimenti sismici attivi MASW.

Tra le prove di repertorio, è risultato molto utile disporre, come vedremo, anche dei dati numerici delle penetrometrie CPTU eseguite dalla RER nell'ambito del “Progetto Carta Geologica d'Italia”. Si tratta di prove eseguite in tutto il territorio di pianura della regione, secondo una distribuzione a “maglia” piuttosto regolare e che consentono di avere dati di sottosuolo fino a profondità di oltre -30 metri (oppure fino a “rifiuto strumentale”), anche all'esterno dei centri abitati (ove notoriamente si concentrano la maggior parte delle informazioni).

Come già scritto, l'Ufficio Tecnico del Comune di Faenza, ha messo a disposizione dati di sottosuolo ricavati da sondaggi a carotaggio continuo, anche con recupero di campioni indisturbati. Si è così potuto disporre di dati di caratterizzazione geotecnica ricavati da prove di laboratorio (prove di taglio diretto “non drenato”; Limiti di Atterberg e analisi tessiturali), pertanto ulteriori elementi utili per la caratterizzazione della risposta sismica locale e per le valutazioni di liquefacibilità dei sedimenti meno profondi.

È importante rammentare l'importanza delle prove di repertorio effettuate in occasione della precedente analisi di microzonazione sismica del Comune, in particolare i sondaggi a carotaggio continuo eseguiti nel centro storico di Faenza, compresa la prova Down-Hole effettuata nella centralissima “Piazza del Popolo”.

Le figure da 4.1 a 4.4 offrono una visione della distribuzione delle prove di repertorio di riferimento per l'intero territorio comunale.

I report e i diagrammi degli esiti delle indagini puntuali e lineari sono riportati anche in formato \*.pdf nella cartella Indagini\documenti contenuti nel DVD.

## **4.2 Le indagini eseguite per la microzonazione sismica**

### *4.2.1 Indagini geognostiche e geofisiche*

Per l'insediato storico di Faenza e per la zona industriale che si sviluppa a nord della ferrovia, si è potuto disporre di una grande quantità di dati di sottosuolo. I dati pregressi sono risultati molto utili per elaborare una prima caratterizzazione sismica territoriale, ma ancora non sufficienti (per tipologia e per qualità dei dati) per espletare in modo sufficientemente accurato gli ulteriori approfondimenti richiesti per questa fase di studio (verifiche della liquefacibilità e modellazione numerica di Risposta Sismica Locale).

Ciò detto, si è deciso di eseguire un ulteriore sondaggio a carotaggio continuo nel centro

abitato, poco a nord della ferrovia (Piazzale Giani). Questa nuova terebrazione ha consentito il prelievo di campioni “indisturbati”, che sono stati sottoposti a specifiche prove dinamiche (prove di “colonna risonante” e prove “triassiali cicliche”). Nel sondaggio, come vedremo, è stata realizzata una ulteriore prova sismica in foro, tipo “Down-Hole”, per la determinazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche nei sedimenti attraversati.

Si è deciso di rieseguire anche le prove sismiche tipo “Down-Hole” già effettuate nei due sondaggi realizzati nel 2009 per lo studio geologico e sismico del PSC (rispettivamente in via Monte di Pietà e Piazza del Popolo), in quanto gli esiti ricavati all'epoca parevano sovrastimare significativamente gli esiti di Vs dei sedimenti granulari (ghiaie della conoide del Lamone).

Negli ambiti di studio localizzati nella parte settentrionale del Capoluogo e nelle frazioni di pianura, sono state eseguite penetrometrie CPTU (10 prove complessive), di cui tre attrezzate con “cono sismico” (SCPTU) e spinte fino ad una profondità di -30 metri (realizzate rispettivamente in via Celletta e nelle frazioni Granarolo e Reda).

Nelle due frazioni di collina Marzeno e Oriolo dei Fichi, particolarmente sguarnite da indagini geognostiche pregresse, sono state eseguite due prove penetrometriche dinamiche super-pesanti (DPSH), in modo da poter identificare il tetto del presumibile “bedrock” sismico.

Sono state eseguite numerose registrazioni del rumore sismico passivo HVSR sia in Pianura, sia nelle frazioni situate in collina e fondovalle. Si precisa che il territorio comunale già disponeva di numerosi stendimenti sismici MASW, realizzati all'epoca dello studio di microzonazione sismica (2009), sebbene anch'essi in vari casi tendevano a sovrastimare le Vs dei sedimenti investigati (fini e granulari). Ad integrazione di tali dati, si sono eseguiti due ulteriori stendimenti sismici in “array” bidimensionale, tipo ESAC, di cui il primo localizzato nel Capoluogo (sempre a nord della ferrovia, poco distante dal Piazzale Giani), mentre il secondo stendimento è stato effettuato nella frazione Granarolo Faentino, cioè in un contesto di più “bassa pianura”.

Più in dettaglio, per questo lavoro sono state eseguite le seguenti prove in sito:

- *n. 7 prove penetrometriche elettriche con piezocono (CPTU)* → realizzate con strumento penetrometrico con max contrasto pari a 200 kN, montato su semovente cingolato “Pagani” dotato di ancoraggi supplementari per migliorare l'ancoraggio al suolo e consentire il massimo approfondimento delle prove (foto 4.1). Le penetrometrie sono state spinte fino a -20 metri di profondità per consentire un ulteriore approfondimento delle caratteristiche tessiturali e geotecniche nell'intervallo più utile ai fini delle verifiche della possibilità di liquefazione e cedimenti post-sisma. Nella figura

4.5 sono riportate le correlazioni<sup>3</sup> utilizzate per la stima delle proprietà meccaniche dei sedimenti indagati.



Foto 4.1 – Una delle prove CPTU eseguite nel Capoluogo (Piazza Giani).

<p><b>Unit Weight, g (kN/m<sup>3</sup>) ::</b></p> $g = g_w \cdot \left( 0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{P_a}\right) + 1.236 \right)$ <p>where <math>g_w</math> = water unit weight</p> <p><b>Permeability, k (m/s) ::</b></p> <p><math>I_c &lt; 3.27</math> and <math>I_c &gt; 1.00</math> then <math>k = 10^{0.952 - 3.04 \cdot I_c}</math></p> <p><math>I_c \leq 4.00</math> and <math>I_c &gt; 3.27</math> then <math>k = 10^{-4.52 - 1.37 \cdot I_c}</math></p> <p><b>N<sub>SPT</sub> (blows per 30 cm) ::</b></p> $N_{60} = \left( \frac{q_c}{P_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$ $N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$ <p><b>Young's Modulus, Es (MPa) ::</b></p> $(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$ <p>(applicable only to <math>I_c &lt; I_{c\_cutoff}</math>)</p> <p><b>Relative Density, Dr (%) ::</b></p> $100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad \text{(applicable only to SBT}_n\text{: 5, 6, 7 and 8 or } I_c < I_{c\_cutoff}\text{)}$ <p><b>State Parameter, <math>\psi</math> ::</b></p> $\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn,cs})$ <p><b>Peak drained friction angle, <math>\phi</math> (°) ::</b></p> $\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$ <p>(applicable only to SBT<sub>n</sub>: 5, 6, 7 and 8)</p>	<p><b>:: 1-D constrained modulus, M (MPa) ::</b></p> <p>If <math>I_c &gt; 2.20</math></p> <p><math>\alpha = 14</math> for <math>Q_{tn} &gt; 14</math></p> <p><math>\alpha = Q_{tn}</math> for <math>Q_{tn} \leq 14</math></p> $M_{CPT} = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v)$ <p>If <math>I_c \leq 2.20</math></p> $M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$ <p><b>:: Small strain shear Modulus, Go (MPa) ::</b></p> $G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$ <p><b>:: Shear Wave Velocity, Vs (m/s) ::</b></p> $V_s = \left( \frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$ <p><b>:: Undrained peak shear strength, Su (kPa) ::</b></p> <p><math>N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r)</math> or user defined</p> $S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$ <p>(applicable only to SBT<sub>n</sub>: 1, 2, 3, 4 and 9 or <math>I_c &gt; I_{c\_cutoff}</math>)</p> <p><b>:: Remolded undrained shear strength, Su(rem) (kPa) ::</b></p> <p><math>S_{u(rem)} = f_s</math> (applicable only to SBT<sub>n</sub>: 1, 2, 3, 4 and 9 or <math>I_c &gt; I_{c\_cutoff}</math>)</p> <p><b>:: Overconsolidation Ratio, OCR ::</b></p> $k_{OCR} = \left[ \frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{-1.25}$ or user defined $OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$ <p>(applicable only to SBT<sub>n</sub>: 1, 2, 3, 4 and 9 or <math>I_c &gt; I_{c\_cutoff}</math>)</p>
---	---

Figura 4.5 – Correlazioni empiriche utilizzate per la stima dei principali parametri geotecnici dei sedimenti da prove CPTU.

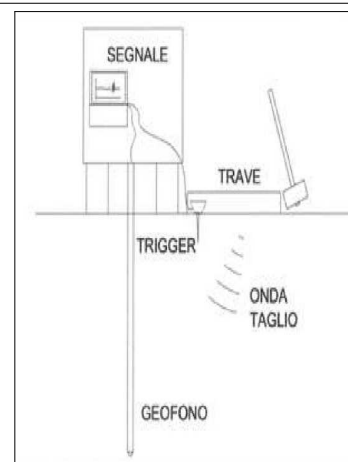
<sup>3</sup>Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010  
 Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11): 1337–1355 (2009)

- *n. 3 prove penetrometriche elettriche con piezocono e "Cono Sismico" (SCPTU)* → realizzate anch'esse con strumento penetrometrico montato su semovente cingolato "Pagani" (foto 4.2). Le prove sono state spinte fino a -31 metri di profondità. La punta è dotata di tre accelerometri, che consentono di misurare direttamente la velocità di propagazione nel terreno delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ). Le modalità esecutive delle prove si basano sull'arresto dell'infissione del piezocono a step regolari (nel nostro caso, la misura è stata eseguita ogni 100 cm di approfondimento, per effettuare l'acquisizione dei dati sismici tramite sensori e sismografo.

**Foto 4.2** – Prova SCPTU eseguita nella frazione Granarolo.



Il sistema di energizzazione del terreno (sorgente delle onde di taglio) è costituito da due masse metalliche compatte poggianti su traversina in legno, caricata con gli stabilizzatori a pistone del penetrometro ad una distanza di 50 cm dalla verticale di prova. A ogni metro di approfondimento, le piastre metalliche vengono colpite con una mazza da 10 kg di peso, con le aste svincolate dal penetrometro stesso (figura 4.6).



**Figura 4.6** – Schema di funzionamento del sismocono.

Tramite i sensori sismici presenti nella punta è possibile rilevare e registrare tali segnali sismici e di conseguenza determinare i tempi necessari alle onde sismiche per percorrere il tratto da piano campagna fino alla profondità dei sensori (tempi di arrivo).

Attraverso il rapporto distanza/tempo di percorrenza, è quindi possibile determinare direttamente e con grande precisione le velocità delle onde sismiche di taglio  $V_s$ .

- *n. 2 prove penetrometriche dinamiche super-pesanti DPSH* (foto 4.3 e 4.4) → spinte fino a "rifiuto strumentale", nei sedimenti impenetrabili allo strumento. La prova DPSH consiste nell'infiggere a percussione nel terreno una punta metallica (angolo di apertura di 60° e superficie di 20 cmq), unita ad una batteria di aste di peso e lunghezza stabilito. La percussione è fornita da un maglio (pesante 63,5 kg, con "volata" pari a 75 cm) battente sulla sommità delle aste. Il numero di colpi necessario per avanzare di 20 cm permette di determinare la resistenza dinamica del terreno, dalla quale è possibile valutare la resistenza alla penetrazione dei sedimenti in funzione della profondità.





**Foto 4.3 e 4.4** – Esecuzione delle prove DPSH nel terrazzo alluvionale presso Marzeno (a sx) e presso Oriolo dei Fichi (a dx).

Inoltre, è possibile stimare i principali parametri meccanici dei sedimenti indagati, attraverso correlazioni statistiche sperimentate da vari autori (tra cui Meyerhof, 1956, Pasqualini, 1983, ecc.), che rapportano il numero dei colpi di una prova continua dinamica con il numero dei colpi della più diffusa e sperimentata prova penetrometrica standard (NSPT).

Tali prove, seppur meno raffinate come qualità di restituzione geotecnica, hanno consentito valutazioni sugli spessori alluvionali (presumibilmente ghiaioso-sabbiosi) nel terrazzo alluvionale di fondovalle ove si insedia la frazione Marzeno, e la stima degli spessori del bedrock molto alterato in affioramento ove si insedia la frazione Oriolo dei Fichi.

- *n. 1 sondaggio a carotaggio continuo* (foto 4.5 e 4.6) → spinto fino a 30 metri di profondità, è stato eseguito nel Capoluogo, poco a nord della linea ferroviaria (piazzale Giani). Si è utilizzata una sonda autocarrata. La terebrazione è proceduta con l'utilizzo di carotieri di diametro pari a 101 mm di tipo semplice T1 e a corona normale, e hanno consentito il campionamento in continuo per la conseguente ricostruzione stratigrafica del terreno. Sono state effettuate manovre di carotaggio di lunghezza <1,5 m per consentire il miglior recupero dei sedimenti in termini di quantità e di minor disturbo. Il carotaggio estratto è stato sistemato in cassette catalogatrici in PVC per la successiva conservazione.

Nel corso del sondaggio si sono prelevati n. 4 campioni indisturbati mediante appositi campionatori a pareti sottili tipo “Osterberg”, spinti a pressione nei sedimenti da terebrare, in quanto consentono un minor disturbo per compressione sul campione (sia fine che sia granulare). Tutti i campioni indisturbati sono stati sigillati su entrambe le estremità della fustella con paraffinatura a caldo e chiusura con tappo. Inoltre, sono state prelevate dalle carote estratte n. 4 campioni indisturbati per effettuare le analisi di

caratterizzazione (tessiture e limiti di Atterberg).



**Foto 4.4 e 4.5** – Sondaggio a carotaggio continuo eseguito in Piazza Giani (a sx) e installazione tubo per “Down-Hole” (a dx).

Si precisa che il sondaggio è stato preceduto dall'esecuzione di una penetrometria CPTU: tale prova ha consentito di valutare preliminarmente la stratigrafia dei sedimenti fini e sabbiosi meno profondi, fornendo un fondamentale aiuto per la “delicata” pianificazione dei punti di campionamento indisturbato.

Il sondaggio è stato inoltre predisposto per l'esecuzione della prova sismica in foro tipo “Down-Hole”.

- *n. 3 prove sismiche in foro tipo “Down-Hole”* (foto 4.6, 4.7 e 4.8) → le prove down-hole sono finalizzate alla determinazione dei profili delle Vs e Vp e sono state realizzate nel Capoluogo, nei fori del nuovo sondaggio eseguito in Piazza Giani e nei due fori del sondaggio eseguiti per lo studio di PSC 2009 (Piazza del Popolo; via Monte di Pietà). Questi ultimi due fori erano stati predisposti per le prove in foro eseguite nel 2009 e risultati ancora ben conservati nel 2015. In generale, la prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno una perturbazione mediante una sorgente meccanica e nel misurare il tempo d'arrivo delle onde dirette, P ed S, alle varie profondità all'interno del foro di sondaggio opportunamente predisposto. Nel metodo sismico Down-Hole viene misurato il tempo necessario per le onde compressive (P) e di taglio (S) per propagarsi tra una sorgente sismica, posta in superficie, e i ricevitori, posti all'interno di un foro di sondaggio. La misura risulta in genere molto accurata e consente di elaborare grafici delle cross correlazioni e delle coppie di registrazioni corrispondenti e determinare i valori degli intervalli di tempo per la determinazione delle Vs e Vp, e del coefficiente di Poisson ( $\mu$ ), di fondamentale supporto per la modellazione numerica di risposta sismica locale. Le prove D-H sono state eseguite con strumentazione di ricezione costituita da due geofoni tridimensionali (sistema “true interval”), in grado di stimare in modo più

verosimile le velocità sismiche dell'intervallo di sedimenti effettivamente indagato.



**Foto 4.6** – Prova Down-Hole eseguita nel foro di sondaggio di Piazzale Giani.



**Foto 4.7 e 4.8** – Prove Down-Hole eseguite nei fori di sondaggio di Piazza del Popolo (a sx) e via Monte di Pietà (a dx).

- *n. 2 prove sismiche in array bidimensionale ESAC* (foto 4.9 e 4.10) → rispettivamente eseguite nel Capoluogo e nella frazione Granarolo Faentino. Il metodo ESAC è un'estensione del metodo SAC (Spatial Auto-Correlation) proposto da AKI nel 1957 ed è utilizzato per determinare la velocità di fase apparente o effettiva delle onde di Rayleigh a partire dalla misura del rumore ambientale. Dato che il rumore ambientale è in genere caratterizzato da onde a basse frequenze (<10-15Hz), la velocità di fase

apparente fornita dal metodo riguarda le basse frequenze e quindi gli strati di terreno o roccia più profondi. In tal senso il metodo ESAC, così come il metodo ReMi, è complementare al metodo MASW attivo eseguito con sorgenti attive comuni.



**Foto 4.9 e 4.10** – Prova MASW/ReMi + ESAC eseguita nell'area Capoluogo. La foto riprende il lato più lungo dell'array bidimensionale disposto a "L".

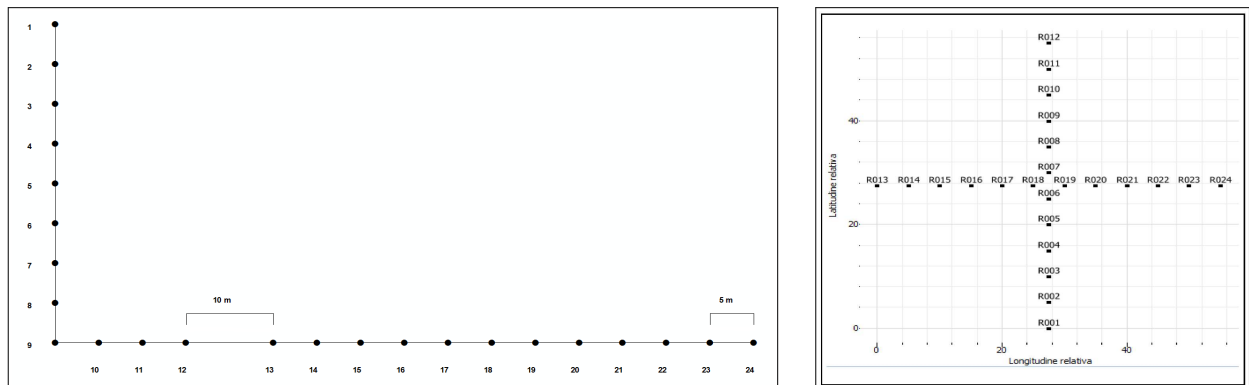
Si rammenta che il metodo ESAC è da preferire rispetto al metodo ReMi perché offre una curva di dispersione sperimentale ottenuta in maniera più oggettiva, contrariamente a quanto avviene nel metodo ReMi, che prevede un picking soggettivo del Professionista della curva di dispersione a partire dallo spettro ReMi nel dominio f-k (frequenza-numero d'onda) oppure f-p (frequenza-lentezza). In conclusione la Prova ESAC offre i seguenti vantaggi:

- consente la stima della  $V_s$  del sottosuolo a maggiori profondità;
- risulta più affidabile del ReMi in quanto consente di fare un picking automatico della curva di dispersione alle basse frequenze;
- si sovrappone con una buona corrispondenza alla curva di dispersione MASW attiva;
- gli esiti ricavati dalle prove MASW/ReMi + ESAC sono complementari dalle basse alle alte frequenze (dagli strati più profondi alla superficie).

L'attrezzatura utilizzata per l'acquisizione è la medesima delle prove MASW e ReMi. La configurazione dei 24 geofoni di acquisizione è stato effettuato secondo un array bidimensionale, disposti a "L" per quella eseguita nell'area Capoluogo, e a "X" per quella eseguita a Granarolo, secondo lo schema riportato in figura 4.7. La prova ha permesso un'elaborazione di buona qualità fino a una bassa frequenza di circa 2 Hz.



**Foto 4.10** – Prova MASW/ReMi + ESAC eseguita nella frazione di Granarolo Faentino. La foto riprende la localizzazione dell'array bidimensionale disposto a “X”.




**Figura 4.7** – Schema geometrico degli stendimenti in array bidimensionale ESAC disposti ad “L” (a sinistra) e a “X” (a destra).

- n. 54 registrazioni sismiche passive HVSR con stazione singola* → Si tratta di una prova non invasiva e l'elaborazione del microtremore misurato fornisce i rapporti spettrali HVSR o H/V (Nogoshi & Igarashi, 1970). La tecnica dei rapporti spettrali (HVSR) trova la sua massima applicazione negli studi di risposta sismica locale poiché consente la stima delle frequenze fondamentali di risonanza del sottosuolo ( $f_r = V_s/4 \cdot H$  con  $H$  = spessore dello strato). In questo modo, le misure tomografiche forniscono un utile supporto alla ricostruzione di sottosuolo ed alla preliminare valutazione della pericolosità sismica, sulla base della stima delle frequenze amplificanti caratteristiche del terreno, oltre alla possibilità di individuare il bedrock sismico di riferimento. Lo strumento utilizzato (figura 4.8) dispone di tre canali di acquisizione connessi a tre

velocimetri elettrodinamici ad alta risoluzione, in grado di misurare le componenti della velocità (moto) di ogni strato lungo le direzioni N-S; E-W; H-V. Si sono eseguite registrazioni di 20 minuti (foto 4.11 e 4.12), oltre a tre acquisizioni di 50 minuti, eseguite in adiacenza delle prove combinate MASW/ReMi+ESAC e delle prove penetrometriche con cono sismico SCPTU, sempre con frequenze di campionamento impostate a 128 Hz.

**Figura 4.8** – Principali caratteristiche strumentali del tromografo TROMINO.

Code	Description
TROMINO® ZERO	 <p>All-in-one digital recorder            10 x 7 x 13 cm, ~ 1 kg            1 Gb storage capacity            battery powered (AA, 2 x 1.5 V)            2 set of spikes for sensor-soil coupling            frequency band 0.1-200 Hz</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 velocimetric channels for seismic ambient microtremor (<math>\pm 1.2</math> mm/s in band)</li> <li>• sampling rates 128, 256, 512 Hz on all channels</li> <li>• rigid transport case</li> <li>• USB cable for data transfer to PC</li> </ul>

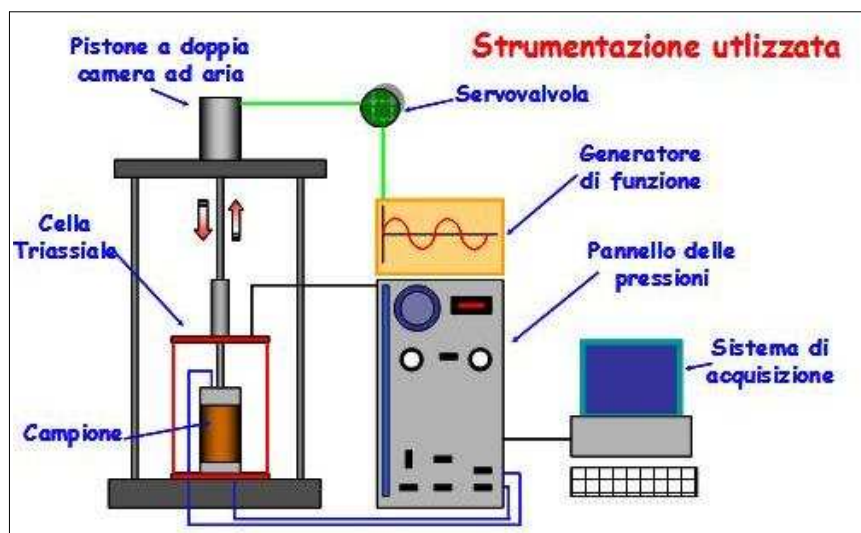


**Foto 4.11 e 4.12** – Prove HVSR eseguite rispettivamente nel Capoluogo (nei pressi della stazione sismometrica "FAEN") e nella frazione di Granarolo (limitrofa alla prova CPTU P9SCPT16). Le frecce rosse indicano lo strumento in fase di registrazione.

#### 4.2.2 Indagini di laboratorio

Il sondaggio eseguito nel Capoluogo (Piazzale Giani) ha consentito di prelevare campioni disturbati per la classificazione geotecnica dei sedimenti. Sono stati prelevati anche campioni indisturbati sui quali sono state eseguite prove geotecniche in condizioni dinamiche. In sintesi, si sono eseguite:

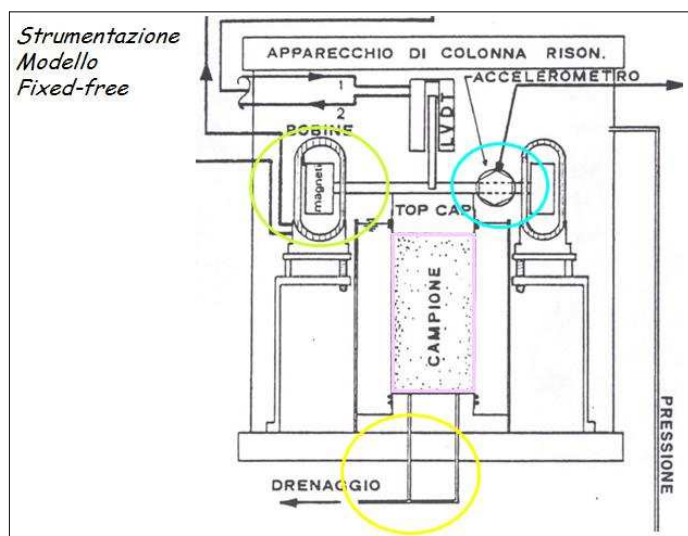
- *n. 3 prove triassiali cicliche a liquefazione* → sono state eseguite su un campione rappresentativo dei sedimenti granulari poco profondi riscontrabili nell'area del sondaggio del Capoluogo (Piazzale Giani). Queste prove consentono la caratterizzazione del comportamento dei terreni sotto carichi ciclici riproducenti le sollecitazioni indotte da sismi. Si rammenta che tali prove trovano impiego per lo studio dei fenomeni di rottura (tra i quali assumono particolare rilevanza quelli di liquefazione delle sabbie) e per valutare l'influenza del livello di deformazione sui moduli dinamici e sullo smorzamento. La prova è stata eseguita per mezzo di una speciale cella triassiale (figura 4.9), posta sotto una struttura di contrasto in modo che un sistema di carico possa applicare sulla testa del provino una forza sinusoidale, di frequenza generalmente compresa tra le frazioni di Hz e qualche Hz. I parametri misurati sono il carico applicato, la pressione in cella, la deformazione verticale e la pressione interstiziale.



**Figura 4.9** – Schema dell'attrezzatura utilizzata per l'esecuzione delle prove triassiali cicliche (fonte: sito ISMGEO).

- *n. 1 prova di colonna risonante (RC)* → Eseguita su un campione rappresentativo dei sedimenti fini poco profondi riscontrabili nell'area del sondaggio del Capoluogo (Piazzale Giani). La prova di colonna risonante consente di determinare il modulo di taglio  $G$  e lo smorzamento dei terreni al variare delle deformazione di taglio imposta, da valori molto piccoli (intorno a 10-5%) fino a circa 10-2%. Viene largamente impiegata in tutti i casi in cui i terreni sono sottoposti a sollecitazioni dinamiche (sisma), per le analisi di deformazione dei terreni e di propagazione delle onde. Sono prove particolarmente utili per le analisi numeriche di risposta sismica locale. Il sistema elettromagnetico è alimentato da un generatore di onde sinusoidali a frequenza variabile. Il segnale elettrico utilizzato per produrre la torsione e quello dell'accelerometro, che misura il moto della testa, sono visualizzati sugli assi X-Y di un oscilloscopio e danno luogo ad una configurazione ellittica quando il campione è in risonanza (figura 4.10). I valori della frequenza di risonanza e dell'accelerazione indotta sono utilizzati per il calcolo del modulo di taglio e delle deformazioni. La curva di

decadimento, prodotta interrompendo in risonanza l'eccitazione torsionale, permette di valutare lo smorzamento del materiale espresso come percentuale dello smorzamento critico.



**Figura 4.10** – Schema della colonna risonante di tipo "Fixed - free" (fonte: sito ISMGEO).

- *n. 8 prove di classificazione* → sono state effettuate otto prove di classificazione dei sedimenti, prelevati dai campioni indisturbati e dai campioni disturbati del sondaggio di Piazzale Gianni. Le prove di classificazione sono state eseguite secondo gli usuali standard di procedura per campioni di terreni: AGI (Associazione Geotecnica Italiana), UNI e ASTM (Volume 04.08 Soil and Rock). Le prove hanno stimato contenuto d'acqua; peso di volume; limite liquido e plastico; fuso granulometrico completo.



## 5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Il contesto geologico generale, descritto nel capitolo 3 e gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili e di nuova esecuzione hanno permesso la classificazione e la modellazione del sottosuolo finalizzata alla caratterizzazione sismica. Le conoscenze litostratigrafiche degli ambiti di studio vengono sintetizzate nella carta Geologico Tecnica (tavole 2 e paragrafo 8.2), che riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5-6 metri) e nella carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavole 4 e paragrafo 8.4), che presenta la suddivisione del territorio dei comuni sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica nei primi 10-20 metri in collina e montagna e fino ad oltre 100 metri in pianura.

### 5.1 Litologie superficiali prevalenti

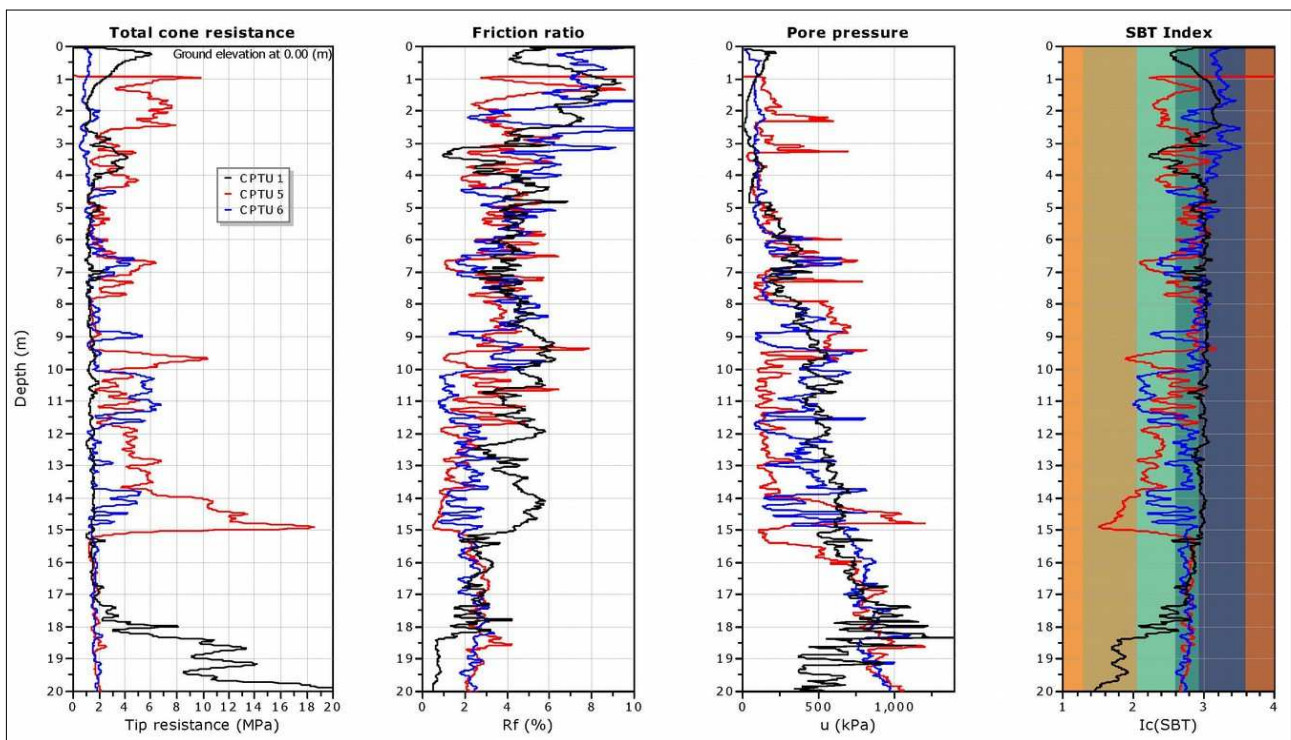
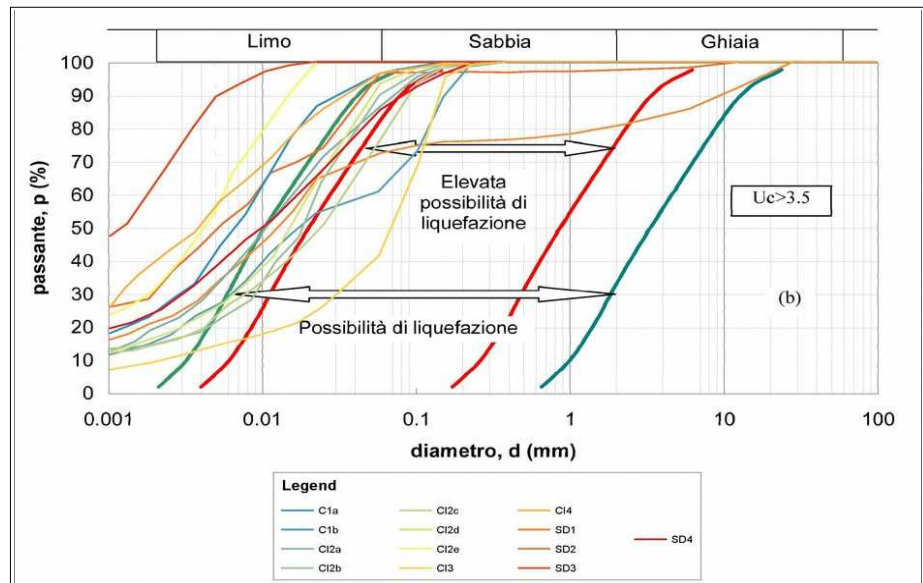
Per la caratterizzazione geologico tecnica dei sedimenti superficiali, lo studio si è basato sul controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo (in particolare sugli esiti delle analisi tessiturali e di classificazione dei campioni prelevati). La scarsità di informazioni tessiturali dirette ha costretto a considerare anche gli esiti delle prove penetrometriche, in quanto si è potuto disporre, oltre ai grafici delle resistenze, anche dei dati numerici di molte prove CPTU eseguite dal SGSS regionale e degli esiti numerici delle indagini CPTU e SCPTU eseguite per questo studio.

Ciò detto, si è potuto disporre di soli 5 sondaggi di repertorio con recupero di campioni e analisi geotecniche effettuate in laboratorio "terre". Gli esiti delle analisi sui campioni superficiali, compresi i dati ricavati con il nuovo sondaggio eseguito nel Capoluogo (Piazzale Giani), consentono di attribuire i sedimenti analizzati a <<limi inorganici a bassa plasticità>>. Queste analisi, riferite allo specifico intervallo di prelievo, hanno certamente consentito una migliore caratterizzazione tessitoriale dell'intera colonna di sedimenti investigata. In sintesi, le colonne di sedimenti superficiali (primi 6 metri) riferite ai soli sondaggi che possiedono esiti di classificazione geotecnica derivata da prove di laboratorio, sono attribuite alle classi USCS/AGI denominate "CL", "ML" e "SM".

La figura 5.1 propone una sintesi delle analisi tessiturali eseguite nei campioni prelevati con il nuovo sondaggio nel Piazzale Giani. Si rammenta che tali analisi sono state eseguite dal laboratorio ISMGEO di Seriate (BG).

Si è quindi deciso di considerare anche gli esiti tessiturali delle prove penetrometriche. In particolare, le prove CPTU regionali e le prove CPTU eseguite per questo lavoro (figura 5.2) hanno premesso di ricavare in modo automatico le tessiture, secondo la nota classificazione dei terreni proposta da P.K. Robertson (1990; 2009).

**Figura 5.1** – Esiti granulometrici ricavati dai campioni del nuovo sondaggio eseguito nel Capoluogo (Piazzale Giani). La figura riporta anche le fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione (da AGI, 2005).



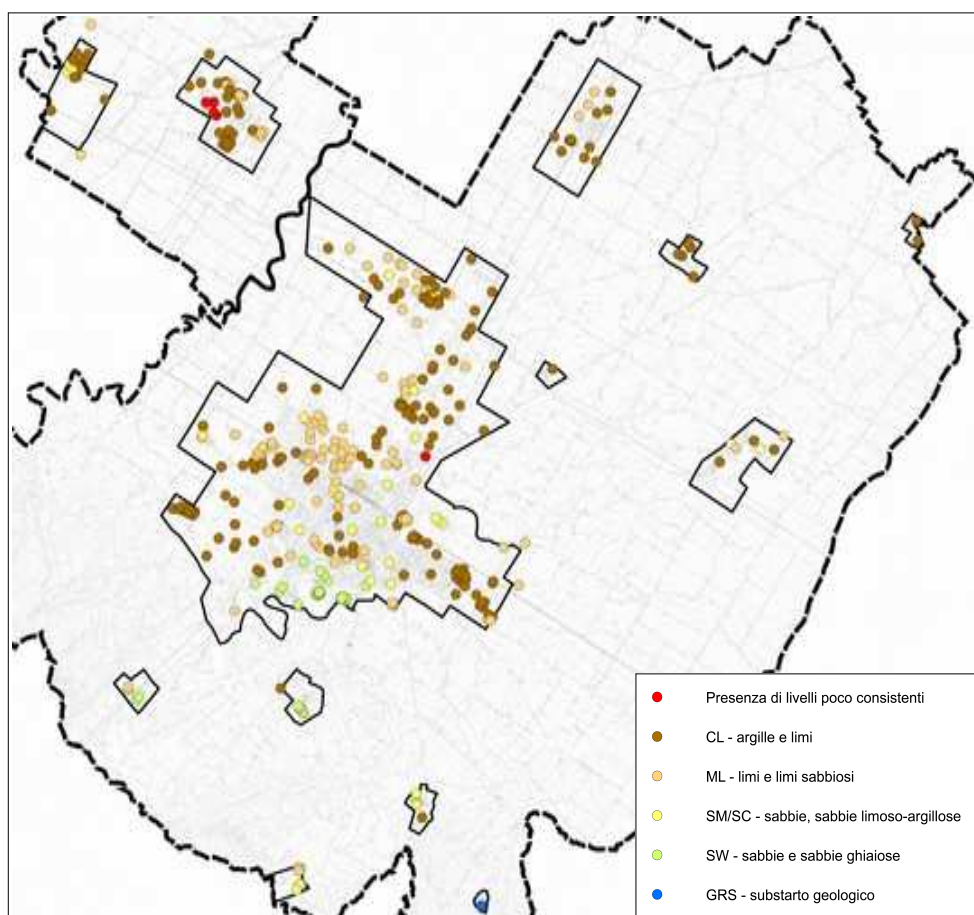
**Figura 5.2** – Esiti tessiturali ricavati da alcune prove CPTU eseguite per questo studio nel Capoluogo (CPTU5 e CPTU6) e Mezzeno (CPTU1).

Si sono peraltro considerate tutte le indagini penetrometriche di repertorio delle quali abbiamo potuto disporre dei soli grafici di resistenze. Tutte queste informazioni, hanno permesso una classificazione dei punti di controllo basata sulle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.3.0) e sulla prevalenza tessiturale riscontrata nella “colonna” di sedimenti profonda fino a -6 metri dal piano campagna. La profondità considerata, è da ritenersi confrontabile con il “volume significativo”

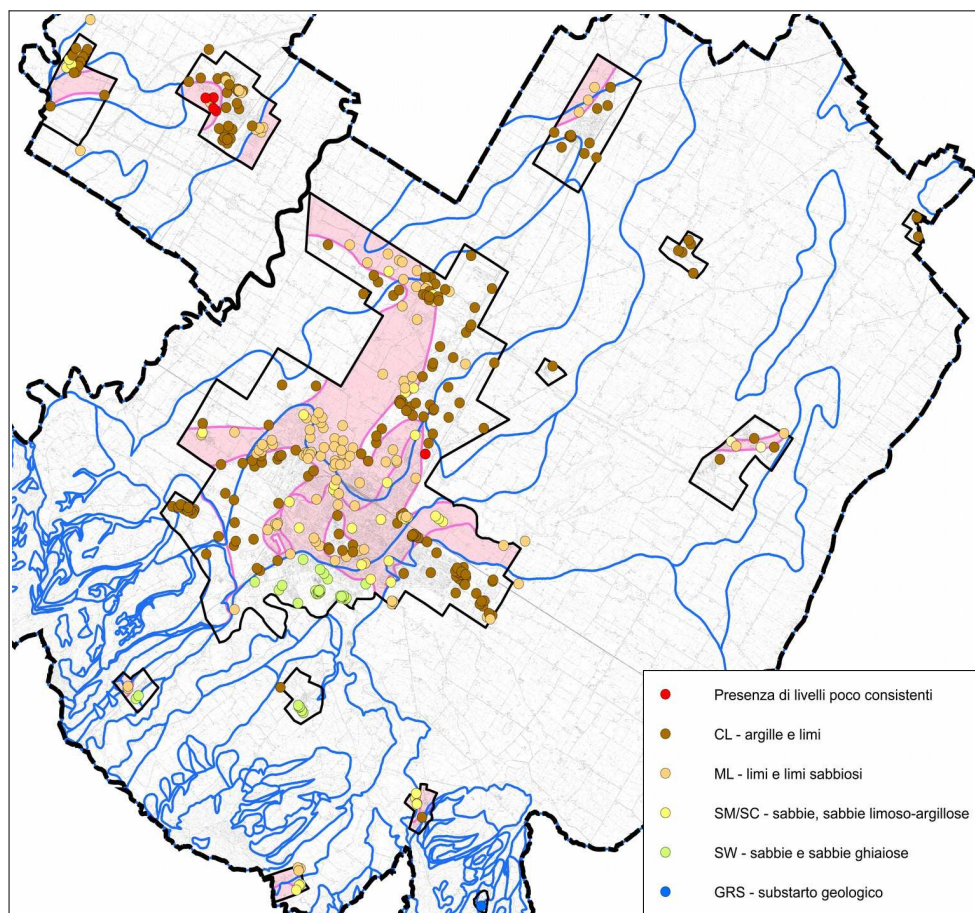
caratteristico della maggior parte degli edifici di normale impegno costruttivo (e dotati di fondazioni “dirette”) presenti nel territorio di studio. Nelle attribuzioni tessiturali da prove penetrometriche, si è fatta particolare attenzione agli spessori di sedimenti insaturi più superficiali, in quanto le condizioni di essiccamento portano molto spesso a correlazioni tessiturali e meccaniche falsate.

Gli esiti puntuali, riportati nella figura 5.3, hanno permesso l'elaborazione della zonizzazione alla base della carta Geologico Tecnica (Tavole 2). In sintesi, a Faenza si evidenzia come gli areali più a sud (fondovalle del Fiume Lamone e del Torrente Marzeno) risultino caratterizzati da tessiture generalmente più grossolane. Verso la pianura, i sedimenti più superficiali presentano tessiture via via più fini (da sabbie limose a limi e argille). Anche nell'area di sviluppo della conoide del Lamone, i sedimenti superficiali risultano prevalentemente fini e sovrastano gli spessori ghiaiosi più profondi (ad eccezione della fascia di alluvioni terrazzate più recenti e limitrofe all'attuale alveo - AES8a -).

In conclusione, le classi geotecniche USCS/AGI riscontrate nel Comune di Faenza sono riconducibili a “GRS” (substrato geologico affiorante a Oriolo dei Fichi), “SW”, “SM”, “SC” “ML” e “CL”.



**Figura 5.3** – Punti di controllo geognostico e classificazione dei sedimenti superficiali (fino a -6 m) secondo il sistema USCS/AGI.



**Figura 5.4** – Confronto tra la classificazione

USCS/AGI dei punti di controllo geognostici e i limiti della carta geologica RER alla scala 1:10.000. Gli areali in colore pieno rappresentano le zone tessiturali classificate “SM”, “SC” e “ML” considerate più suscettibili a fenomeni di liquefazione.

Confrontando gli esiti tessiturali con la cartografia geologica RER (figura 5.4), si riscontra una buona correlabilità per quanto riguarda gli areali collinari e di fondovalle, mentre verso la pianura emergono maggiori differenze, probabilmente riconducibili alla specifica profondità considerata per la classificazione geotecnica e a differenti contesti deposizionali locali.

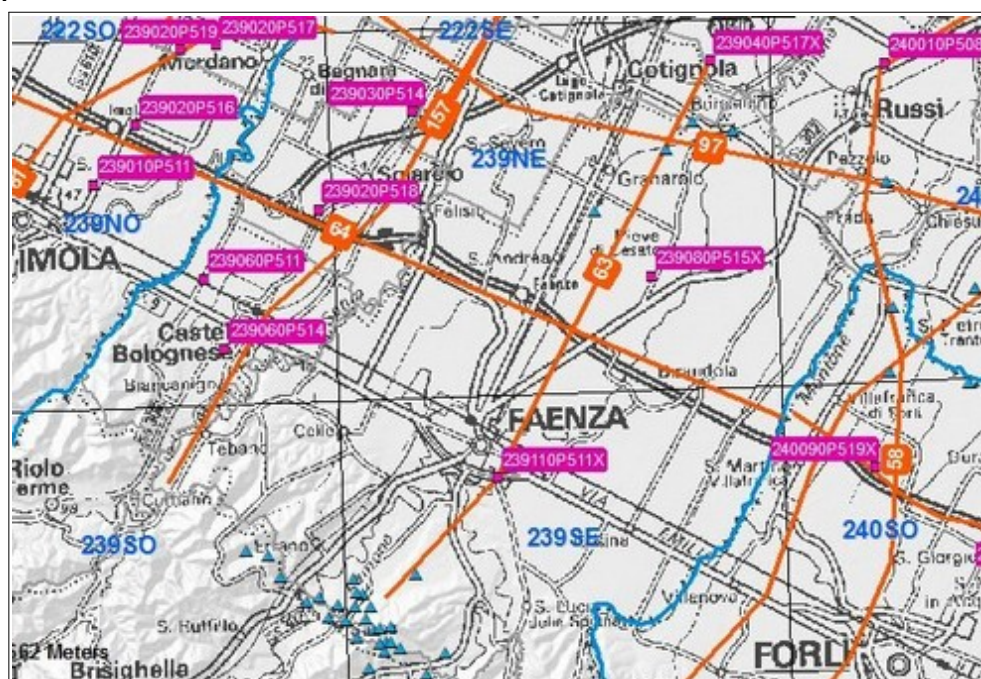
## 5.2 Sottosuolo profondo

Gli areali del territorio amministrativo faentino più meridionali (Errano; Marzeno; Oriolo dei Fichi; Santa Lucia), sono attribuibili ad un contesto di margine appenninico, con bedrock marino sub-affiorante oppure sovrastato da coperture alluvionali quaternarie di modesto spessore. La generale scarsità di informazioni di sottosuolo, rispetto agli altri ambiti di studio situati in pianura, ha richiesto l'esecuzione di alcune indagini penetrometriche (DPSH) per valutare gli spessori delle coltri alluvionali e/o la presenza di bedrock affiorante più o meno alterato.

La località Oriolo dei Fichi risulta l'unico areale di studio ove la cartografia geologica RER

indica il substrato marino plio-pleistocenico in affioramento (“Argille Azzurre” FAA e “Sabbie Gialle” IMO). Peraltro, si tratta di un substrato roccioso “tenero”, facilmente alterabile, come dimostrato dalle prove geofisiche e geognostiche eseguite per questo studio nei pressi di Oriolo dei Fichi. La prova DPSH ha infatti attraversato circa 15 metri di substrato roccioso alterato prima di concludersi a “rifiuto strumentale”, mentre le registrazioni HVSR evidenziano “picchi spettrali” H/V a medie frequenze (circa 5,4÷5,9 Hz) correlabili con spessori di bedrock molto alterato di 15÷20 metri).

Per gli altri tre ambiti di margine appenninico (Errano; Marzeno; Santa Lucia), le indagini effettuate e/o di repertorio evidenziano la presenza di coltri alluvionali sovrastanti spessori di bedrock marino plio-pleistocenico FAA e IMO molto alterato. Anche in questo caso, le registrazioni HVSR, confrontati con i dati di prove penetrometriche, mostrano alti spettrali correlabili con lo spessore complessivo (alluvioni recenti e bedrock molto alterato) stimabile in 15÷20 m.



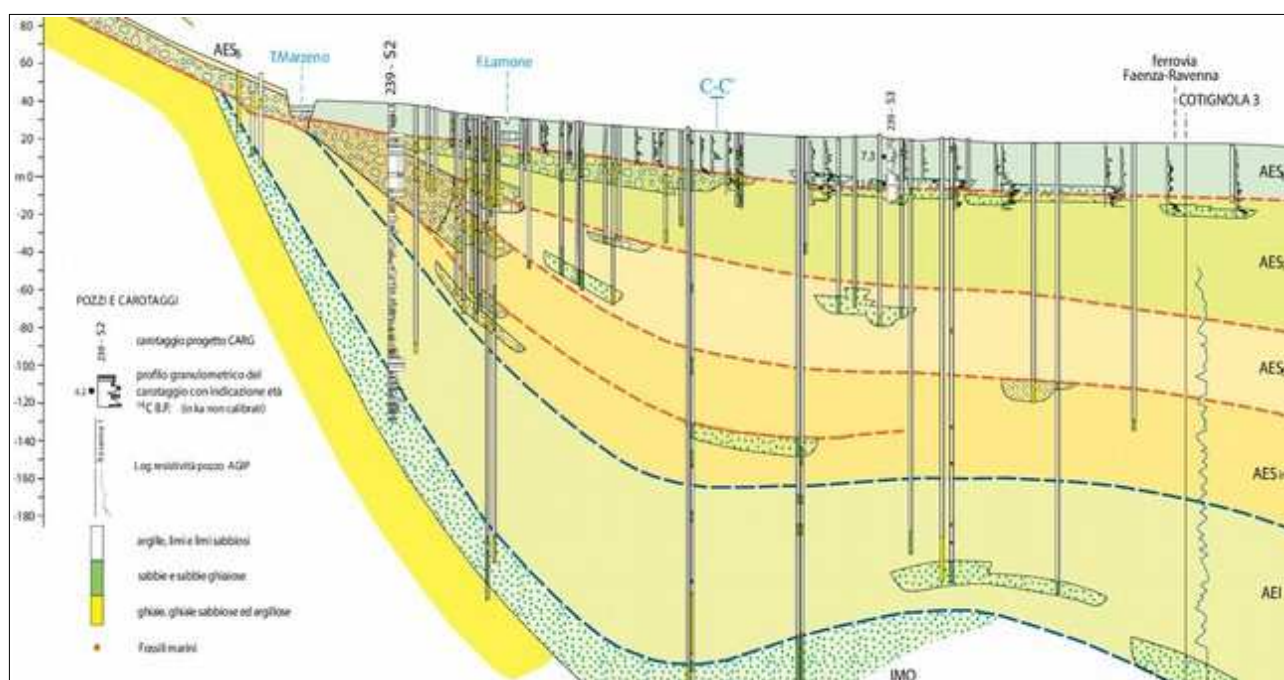
**Figura 5.5** – Tracce delle sezioni geologiche RER pubblicate nel sito del SGSS regionale.

Per quanto riguarda l'ampia porzione del territorio di pianura faentino, i dati di repertorio sono desunti dagli studi geologici e sismici della pianura padana, effettuati da ENI-AGIP e dal SGSS regionale. Ulteriori e fondamentali riferimenti per l'elaborazione del modello di sottosuolo della pianura, sono desunti dalla recente esperienza di microzonazione sismica dell'Unione della Romagna Faentina (Marabini, 2009) e dai più recenti studi geologici e sismici delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana del maggio 2012<sup>4</sup> a cura del SGSS regionale.

In questo senso, sono disponibili le sezioni geologiche RER n. 97, n. 64 e n. 63 (figura 5.5), allegate anche alla presente Relazione.

<sup>4</sup>Studi eseguiti in ossequio all'Ordinanza del Commissario delegato – Presidente della regione Emilia-Romagna n.70/2012.

Per il territorio di Faenza la sezione RER n. 63 offre un'importante ricostruzione schematica del sottosuolo profondo, dal margine appenninico affiorante retrostante il Capoluogo, fino alla “media” e “bassa” pianura nei pressi di Cotignola. La ricostruzione stratigrafica della sezione è supportata dai dati diretti di sondaggi RER e di sondaggi profondi AGIP (eseguiti tra Granarolo Faentino e Cotignola). Quest'ultima sezione offre anche una rappresentazione della conoide sepolta del Fiume Lamone (figura 5.6), che interessa un'ampia porzione di sottosuolo dell'abitato storico di Faenza. In particolare, il sondaggio denominato con la sigla “239110P511X” (e con sigla “239-S2”) nella Banca Dati geognostica RER, ha raggiunto la profondità di 169,5 metri, consentendo di attraversare tutto lo spessore alluvionale AES/AEI e di raggiungere il sottostante substrato marino pleistocenico (IMO).



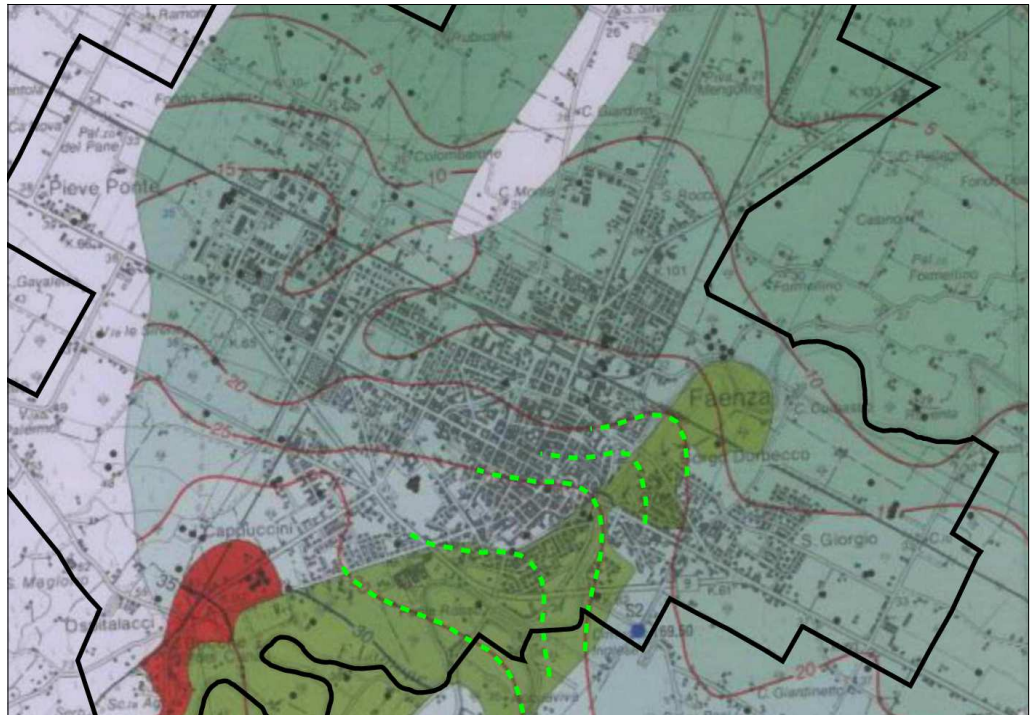
**Figura 5.6** – Stralcio della Sezione n.63 pubblicata nel sito del SGSS regionale.

Il territorio immediatamente a sud e sud-ovest del Capoluogo (compreso l'areale di studio della frazione Pettinara e le località tra le quali Villa San Prospero, Celle, Sant'Orsola) è caratterizzato da spessori alluvionali di piana o conoide terrazzata con alternanze di sedimenti fini e granulari (anche ghiaie) di spessore variabile e riconducibili ai cicli deposizionali (AES5 e AES6). Le indagini geofisiche e in particolare le registrazioni HVSR non riscontrano particolari amplificazioni: ciò è spiegabile per la presenza di alluvioni relativamente “antiche”, con intercalazioni anche ghiaiose, sovrastanti il bedrock marino non particolarmente rigido (FAA e IMO), pertanto senza contrasti d'impedenza particolarmente marcati.

Nel territorio corrispondente al Capoluogo, le registrazioni HVSR effettuate mostrano una differente risposta sismica in funzione della presenza o meno delle potenti sequenze

ghiaiose della conoide del Lamone. In tal senso, un importante contributo conoscitivo è fornito dalla ricostruzione del tetto delle ghiaie attribuibili ai più recenti cicli deposizionali "AES7", "AES8" e AES8a" (ISPRA, Foglio geologico n. 239 Faenza, 2009). In particolare, la figura 5.7 rimarca la zona caratterizzata da corpi ghiaiosi più superficiali e più potenti. I dati di sottosuolo disponibili hanno consentito l'elaborazione di un'ulteriore sezione geologica (denominata con sigla 1-1', figura 5.8) che attraversa il Capoluogo, più dettagliata per quanto riguarda la stratigrafia meno profonda (fino a circa -30 metri).

**Figura 5.7** – Stralcio della "Carta del tetto delle Ghiaie" allegata alla Carta Geologica d'Italia – Foglio 239 Faenza (ISPRA e SGGS della Regione Emilia-Romagna). In tratteggio verde le isobate del tetto delle ghiaie AES7.



Nella parte sud-ovest dell'abitato di Faenza e grosso modo fino alla via Emilia, alcune registrazioni HVSR riescono a discriminare un blando picco spettrale a frequenze di  $1,15 \div 1,20$  Hz, in quanto le successioni ghiaiose di conoide risultano meno potenti rispetto alla parte orientale del Capoluogo (dove le principali amplificazioni spettrali vengono misurate a frequenze medio-alte). Tale amplificazione spettrale potrebbe essere dunque riconducibile al principale riflettore sismico correlato al tetto del bedrock marino pleistocenico. Nella parte sud-ovest del Capoluogo (fino alla via Emilia) i sedimenti marini appaiono meno scavati rispetto al settore orientale, quindi con coperture alluvionali complessivamente meno potenti (<math>100 \div 120</math> metri?).

Le registrazioni HVSR eseguite nella parte est e sud-est del Capoluogo (figure 5.9 e 5.10), mostrano amplificazioni spettrali più marcate per frequenze medio-alte (tra 3 Hz e 8 Hz). Il bedrock marino IMO è rilevato nel sondaggio S2-RER (sigla P357S397), ad una profondità di circa 160 metri: la registrazione HVSR eseguita in adiacenza a questa terebrazione ha evidenziato un massimo di amplificazione spettrale a circa 3,8 Hz (tetto ghiaie) e ulteriori amplificazioni a frequenze  $\leq 1$  Hz (bedrock marino?).

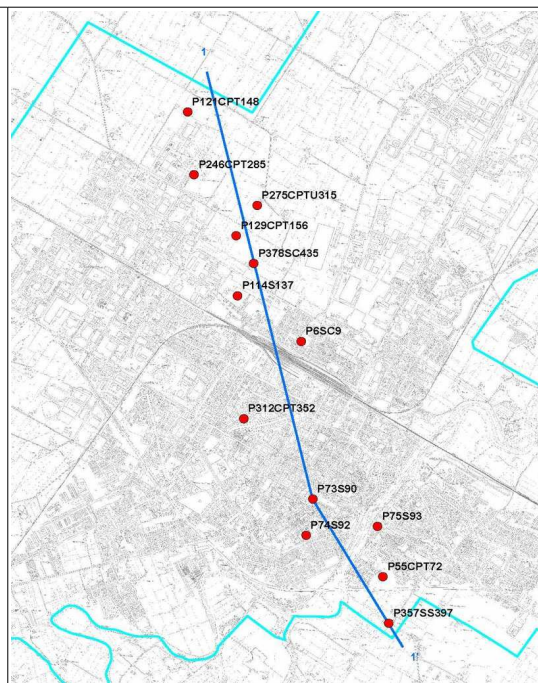
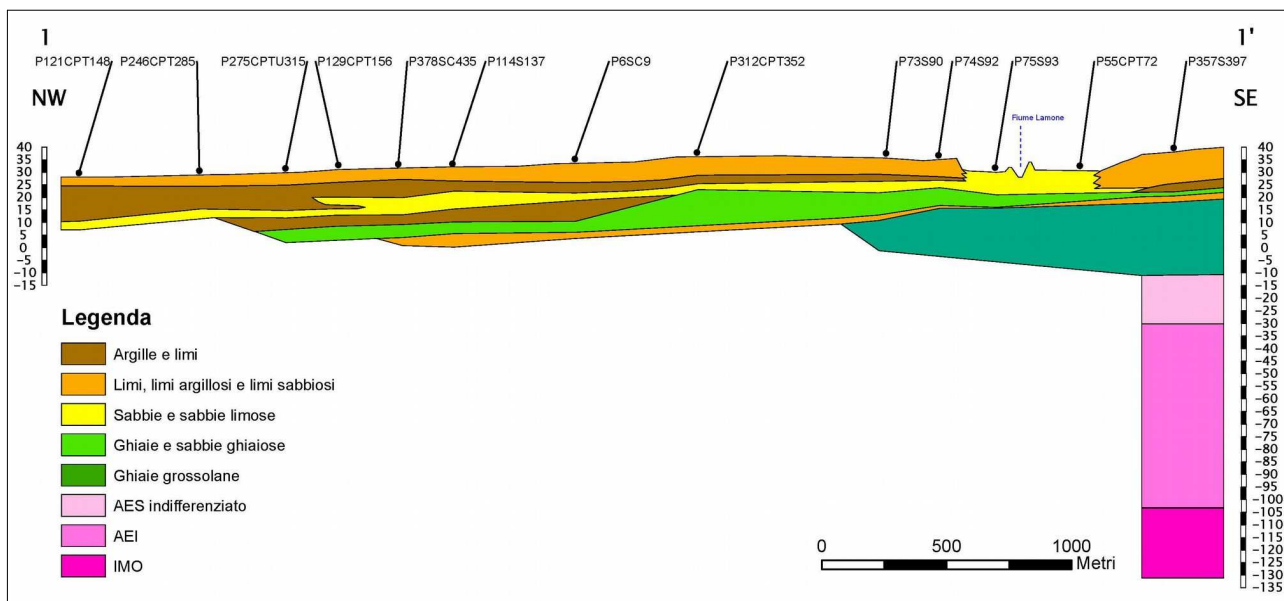


Figura 5.8 – Sezione geologica 1-1' elaborata per il Capoluogo faentino. A dx la localizzazione planimetrica.

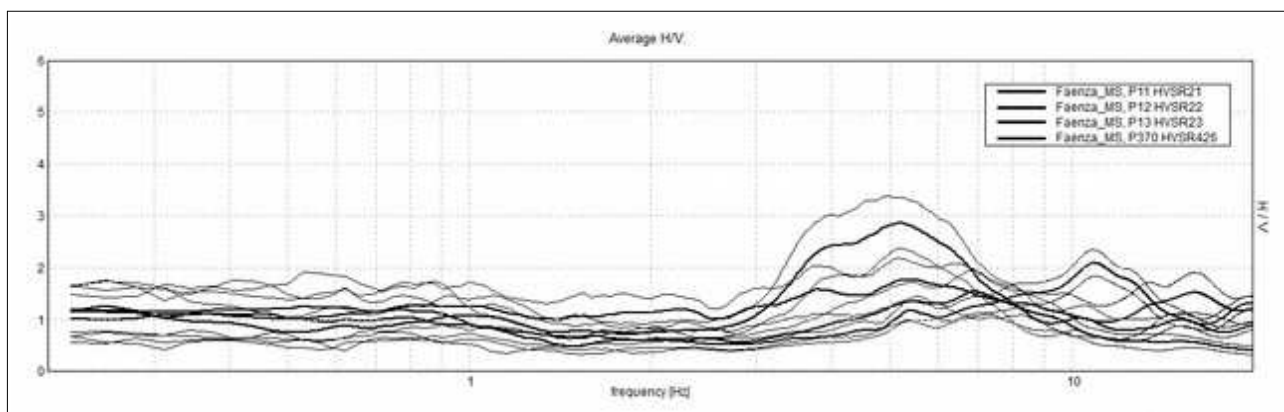


Figura 5.9 – Spettri H/V delle registrazioni dei microtremori sismici nel settore sud del Capoluogo.



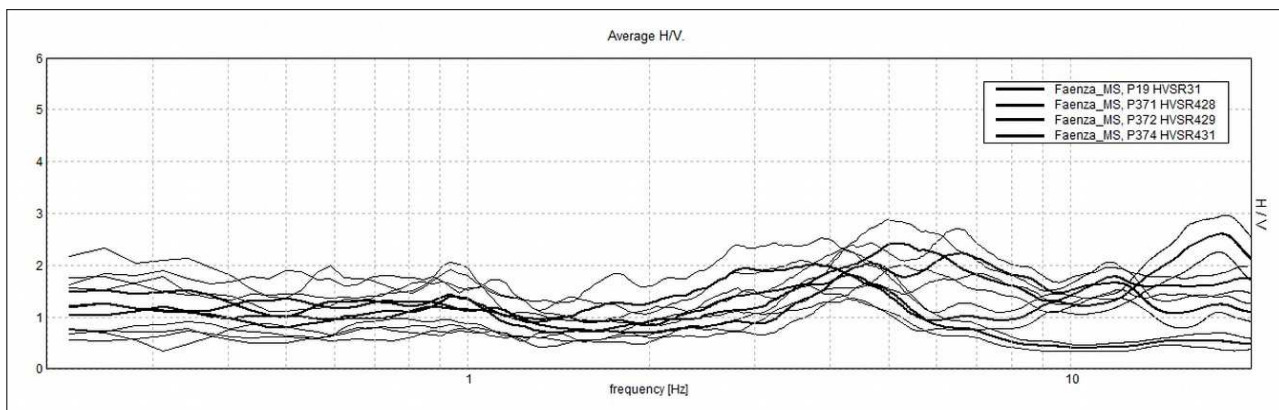


Figura 5.10 – Spettri H/V delle registrazioni dei microtremiti sismici nel settore sud-est del Capoluogo.

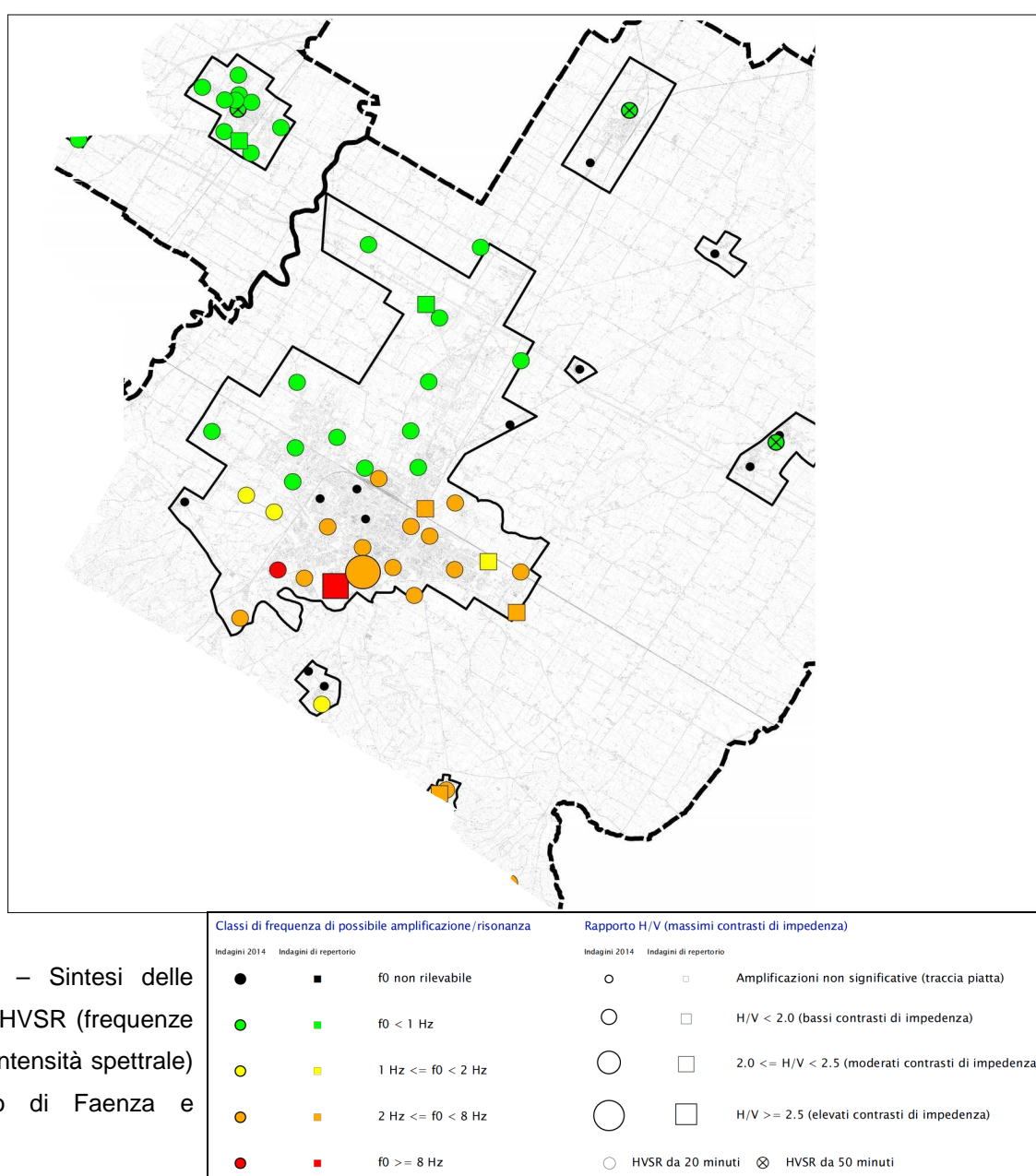
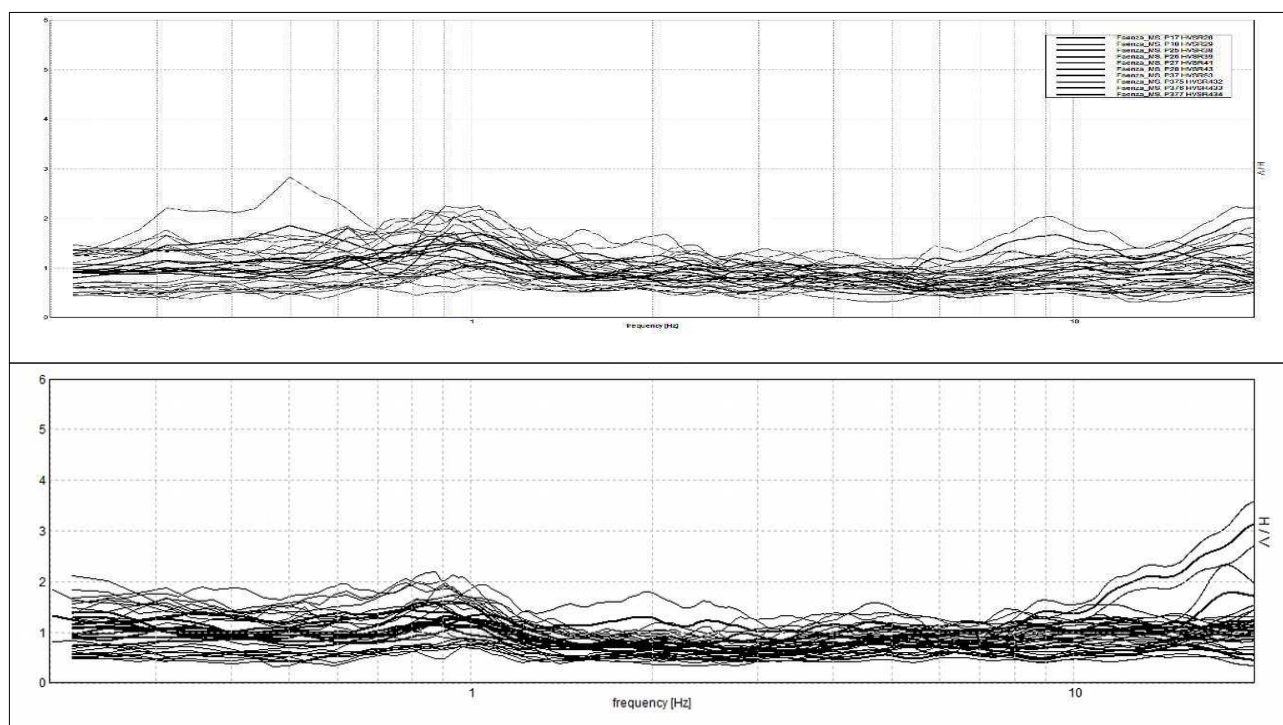


Figura 5.11 – Sintesi delle registrazioni HVSR (frequenze di massima intensità spettrale) nel territorio di Faenza e Solarolo.

La figura 5.11 riporta uno schema di sintesi dei principali picchi di amplificazione H/V (frequenze fondamentali) ricavati dalle registrazioni di microtremore a stazione singola (HVSR) del sottosuolo nei territori di Faenza e Solarolo. In quest'ultima figura, le frequenze fondamentali sono state distinte in classi, come indicato nella DGR 1919/2012. Nei settori di “media” e “bassa” pianura, le registrazioni HVSR, hanno evidenziato spettri di amplificazione H/V piuttosto omogenei tra loro, cioè tracce piuttosto smorzate e con massimi picchi spettrali di amplificazione H/V ricavati alle basse frequenze (figure 5.11 e 5.12).

In generale, salvo alcune anomalie riscontrate negli esiti di acquisizione di poche prove, le frequenze di amplificazione fondamentali ( $f_0$ ) misurate nella “media” e “bassa” pianura di Faenza sono risultate minori di 1 Hz, con un blando decremento delle frequenze verso nord (da 0,90 Hz a circa 0,70 Hz).

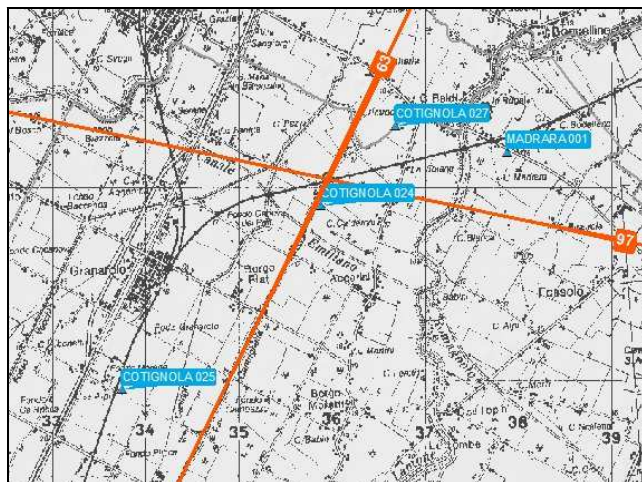


**Figura 5.12** – Spettri di amplificazione H/V ricavati dalle registrazioni tomografiche effettuate nella “media” pianura (in alto) e nella “bassa” pianura di Faenza (in basso).

Come già scritto, le terebrazioni disponibili nella pianura (penetrometrie; sondaggi; pozzi per acqua e log di resistività) hanno consentito di rappresentare nelle sezioni geologiche RER anche i limiti di trasgressione/regressione che risultano alla base della classificazione stratigrafica convenzionale dei depositi alluvionali di pianura (sintemi e subsintemi).

Nella “bassa” pianura faentina, i dati di sottosuolo profondo sono derivati dalle indagini geognostiche e geofisiche dell'AGIP. In particolare, i pozzi AGIP hanno consentito un

maggior dettaglio stratigrafico, sebbene per la finalità della loro esecuzione, risultano lacunose nella stratigrafia più superficiale.

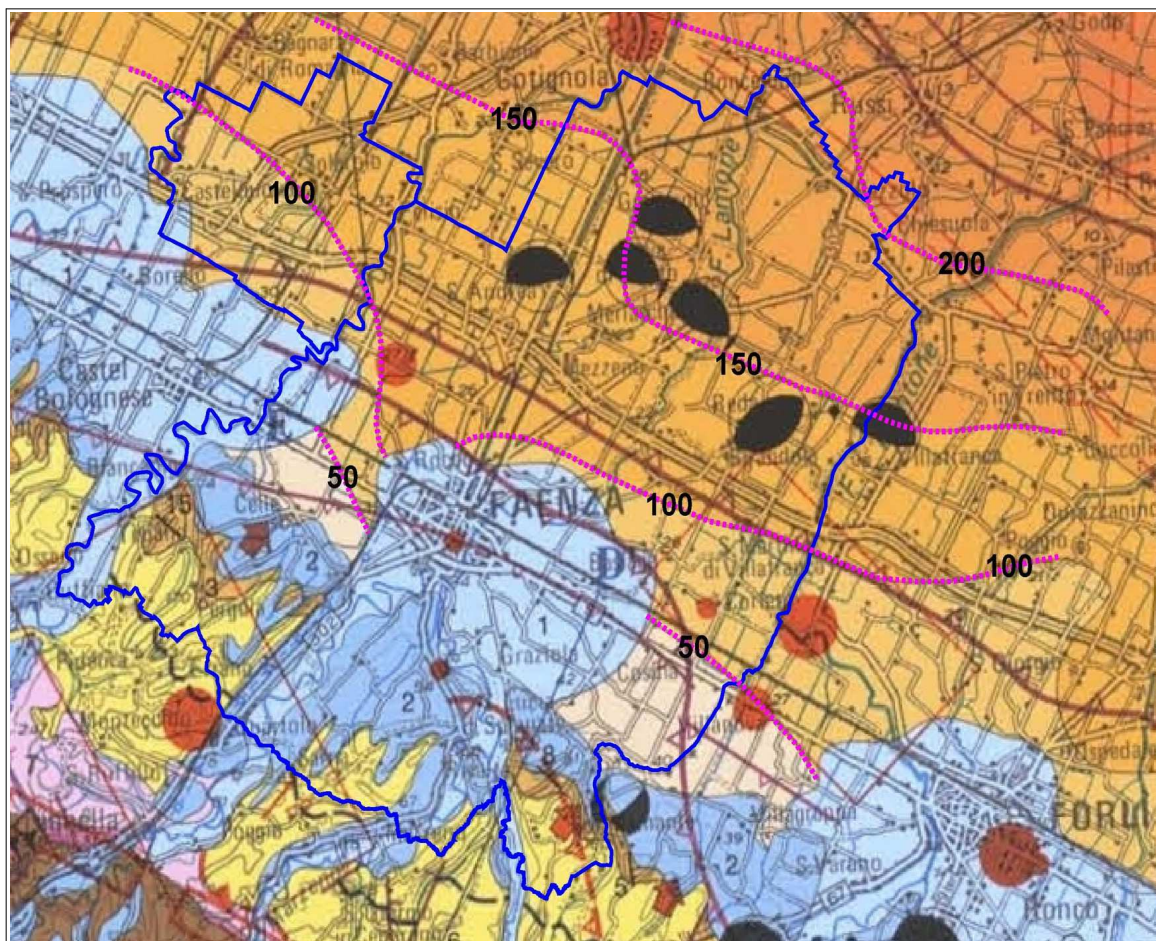


**Figura 5.13** – Localizzazione dei Pozzi AGIP di interesse per il territorio di pianura faentino.

In questo senso, il territorio comunale faentino più settentrionale è stato interessato da alcune terebrazioni AGIP (figura 5.13) spinte fino al substrato marino miocenico e pliocenico. L'esecuzione del pozzo "Cotignola n.25" non ha previsto il rilievo della stratigrafia dei primi 400 metri di sedimenti, mentre ha attraversato la potente sequenza del bedrock "tenero" marino plio-pleistocenico costituito da sedimenti prevalentemente fini (argille prevalenti e sabbie fini argillose con intercalazioni di argille marnose) fino a circa 2.000 metri di profondità. Più a nord (in comune di Cotignola), il sondaggio AGIP "Cotignola n.27" manca di una stratigrafia dettagliata fino a circa 250 metri di profondità, ma individua il limite tra depositi alluvionali e substrato marino a circa -300 metri (base Sintema AEI). Si evidenzia che, in entrambi i sondaggi, il bedrock marino attraversato è costituito da alternanze di argille prevalenti, argille molto sabbiose e sabbie argillose fino a oltre 1.300 metri.

La Carta Sismotettonica RER alla scala 1:250.000 (figura 5.14), rappresenta un'ulteriore e fondamentale sintesi conoscitiva anche per il sottosuolo profondo della pianura. Questa cartografia regionale riporta le principali strutture tettoniche sepolte e l'andamento delle isobate della base del sintema AES. Nel territorio di Faenza e Solarolo, le alluvioni AES si approfondiscono verso NE, raggiungendo spessori massimi di circa 170 metri nelle aree al limite con i territori amministrativi di Cotignola e Russi.

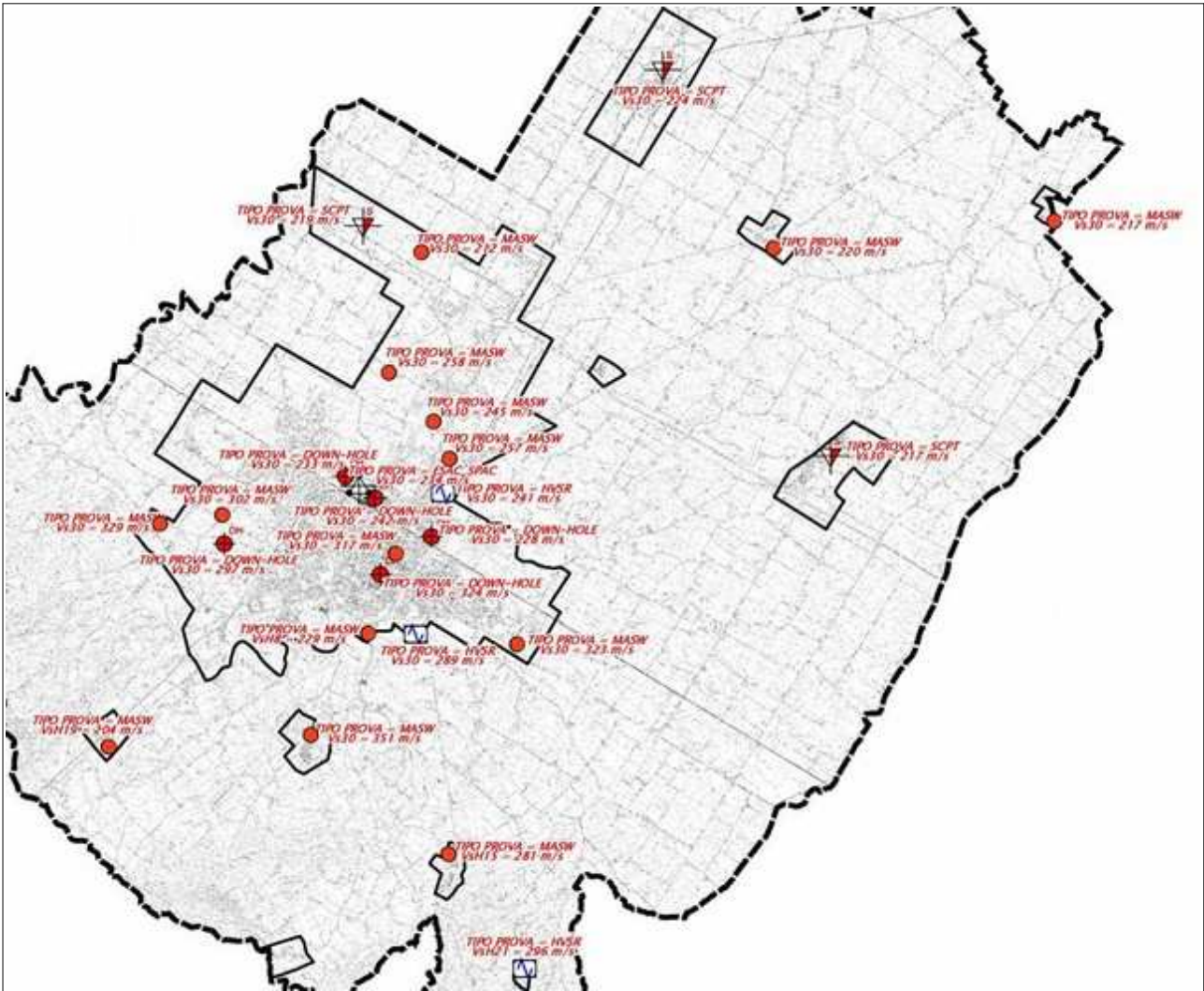
È interessante rammentare che le indagini eseguite per la microzonazione sismica dei Comuni maggiormente danneggiati dai terremoti del 2012 hanno evidenziato, per gli ambiti di pianura emiliana studiata, un primo forte contrasto di impedenza nei depositi alluvionali, in genere tra la base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES, datata 400.000-450.000 anni) e la base del subsintema AES6 (datata 230.000-250.000 anni), mentre una seconda importante discontinuità sismica corrisponde alla più profonda interfaccia tra depositi alluvionali e bedrock marino (Martelli & Romani, 2012).



**Figura 5.14** – Stralcio della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna alla scala 1:250.000 (SGSS e CNR, 2004) e territorio comunale di Faenza e Solarolo. Il colore pieno in arancione discrimina la differente profondità della base del Sistema Emiliano-Romagnolo superiore AES (le quote delle isobate si riferiscono al livello medio del mare).

Le indagini geognostiche e geofisiche eseguite per questo studio hanno fornito ulteriori dati utili per la caratterizzazione sismica del sottosuolo. La figura 5.15 localizza, ad esempio, le indagini ove si sono ricavate le velocità delle onde sismiche di taglio nei sedimenti ( $V_s$ ), risultate di riferimento per questo studio.

In particolare, nel Capoluogo, il sondaggio eseguito nel Piazzale Giani ha permesso di eseguire una prova sismica in foro “Down-Hole” spinta fino a -30 metri. Sono state rieseguite altre due prove DH nei fori dei sondaggi realizzati per il precedente studio di microzonazione sismica (2009) e si è potuto disporre di altre due DH eseguite nel Capoluogo rispettivamente nei pressi di via Cimabue e via Filanda Vecchia. Gli esiti di queste prove in foro hanno consentito di ricavare misure dirette delle velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio e di compressione ( $V_s$  e  $V_p$ ), e in particolare hanno permesso la caratterizzazione di buon dettaglio delle  $V_s$  e  $V_p$  dei depositi di conoide meno profonda del Lamone (figura 5.16).



**Figura 5.15** – Localizzazione delle indagini geofisiche di Faenza con i valori di Vs risultati riferimento per questo lavoro.

Nel Capoluogo, è stato eseguito uno stendimento sismico in “array” ESAC tra le due DH di Piazzale Giani e via Cimabue: il controllo con i dati delle due prove dirette ha consentito di elaborare un ulteriore profilo delle Vs di buona qualità, approfondito fino a circa 70 metri (figura 5.17). Un altro stendimento in “array” ESAC è stato eseguito nella “bassa” pianura presso la frazione di Granarolo Faentino (figura 5.17).

Nella “media” e “bassa” pianura faentina, le misure dirette delle Vs sono state acquisite mediante tre “Coni Sismici”, rispettivamente realizzati in via Celletta e nelle frazioni di Granarolo Faentino e Reda, spinti fino a -30 metri (figura 5.18).

Occorre infine rammentare che il sondaggio eseguito nel Piazzale Giani ha permesso di effettuare prove di laboratorio in campioni indisturbati e disturbati prelevati dalla terebrazione. In particolare, sono state realizzate numerose prove di classificazione geotecnica e due specifiche prove dinamiche (“triassiali cicliche” CTX e “colonna

risonante” RC) su campioni indisturbati, per ulteriori approfondimenti sulla liquefacibilità dei sedimenti incoerenti e sull'amplificazione sismica locale in caso scuotimento sismico (descritti nel capitolo 7).

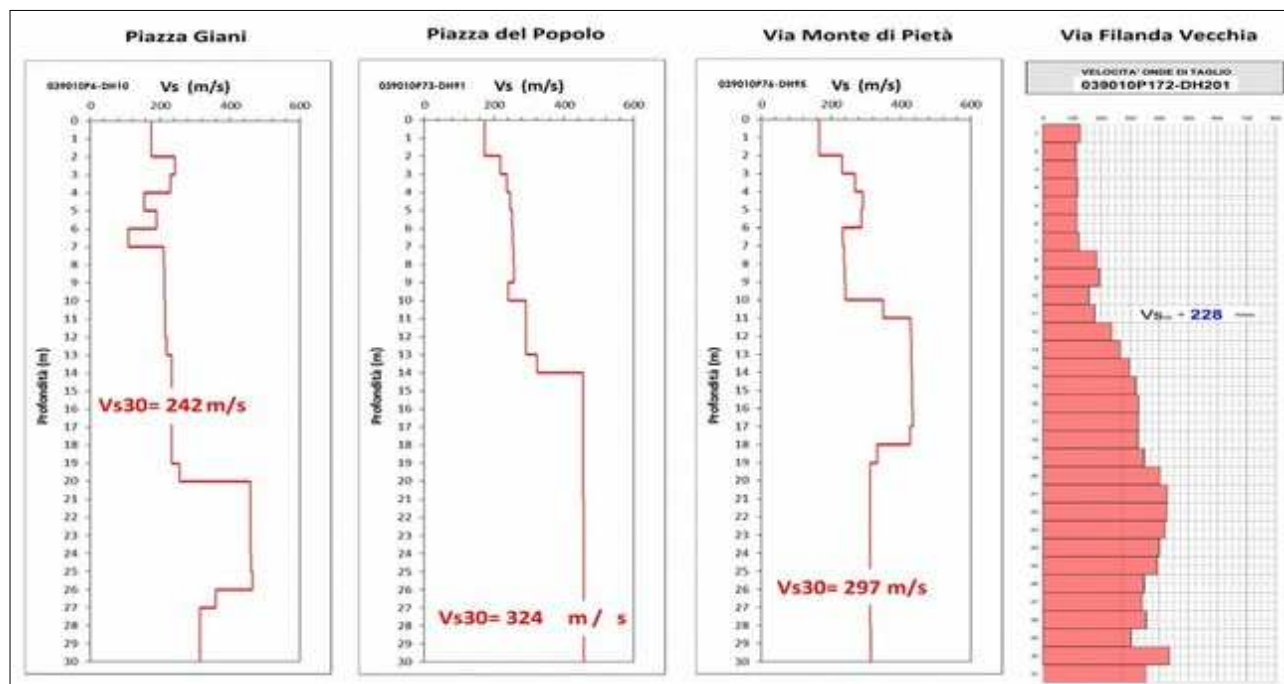


Figura 5.16 – Profili di Vs ricavati da quattro prove sismiche in foro “Down-Hole” del Capoluogo. I valori più elevati di Vs sono ricavati nelle ghiaie meno profonde di conoide del Fiume Lamone (cicli “AES8” e “AES7”).

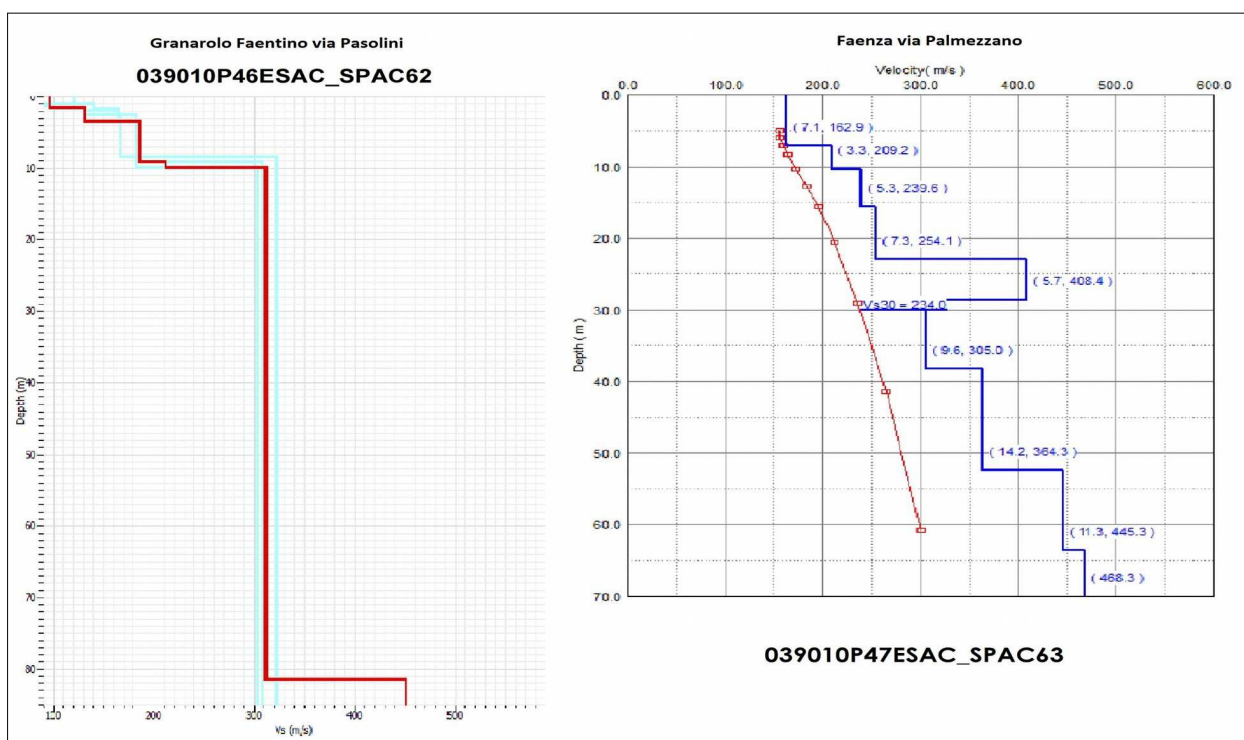
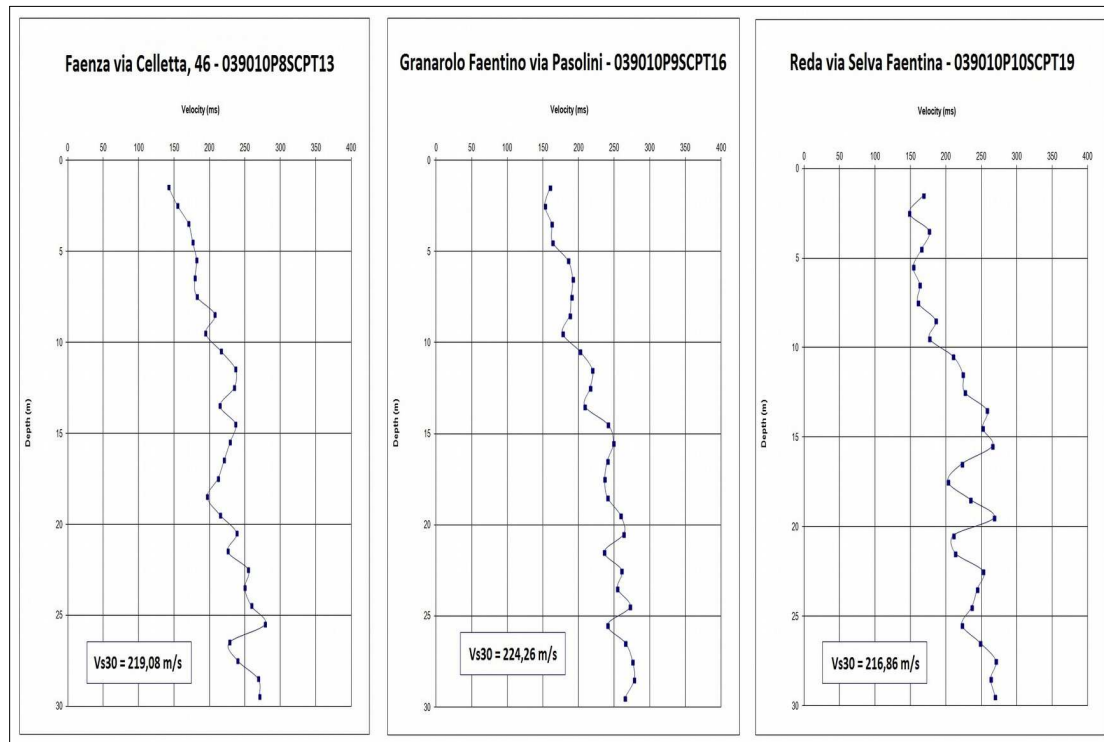


Figura 5.17 – Profili di Vs ricavati dagli stendimenti ESAC di Granarolo e di Faenza (via Palmezzano).



**Figura 5.18** – Profili di Vs ricavati dalle prove penetrometriche con “Cono Sismico” (SCPTU) ed eseguite nella “bassa” pianura faentina.

## 6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Nel presente capitolo vengono esaminate le principali scelte effettuate a scopo interpretativo, partendo dall'esposizione del percorso logico seguito per delineare la struttura dello studio, evidenziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando anche di valutarne le inevitabili incertezze e le eventuali criticità.

### 6.1 Considerazioni relative alla risposta sismica locale

Lo studio di microzonazione sismica di Faenza è supportato da numerose indagini di repertorio geognostiche e geofisiche. Sono infatti disponibili molte prove penetrometriche e sondaggi a carotaggio continuo che consentono di estrapolare stratigrafie piuttosto dettagliate fino alla profondità investigata. Peraltro, si tratta di terebrazioni poco profonde: la maggior parte delle indagini geognostiche risultano investigare i primi 10÷15 metri di sottosuolo; solo alcuni sondaggi e poche prove penetrometriche (queste ultime eseguite nella "bassa" pianura) sono state spinte fino a 30 metri di profondità.

Come già scritto, negli areali di pianura sono disponibili "pozzi per acqua" che hanno raggiunto profondità più significative ma con stratigrafie generalmente poco attendibili. Sono inoltre disponibili le stratigrafie di alcuni pozzi esplorativi AGI: si tratta di sondaggi molto profondi, che hanno raggiunto il substrato marino miocenico o pliocenico, ma prive delle stratigrafie superficiali, anche per centinaia di metri, in quanto per tale intervallo (privo di interesse per quanto riguarda la ricerca di idrocarburi) l'approfondimento è risultato speditivo e a distruzione. In conclusione, le informazioni di sottosuolo profondo negli areali di pianura sono riconducibili a tre sondaggi profondi (vedi capitolo 5), alle sezioni geologiche e ai contenuti della cartografia sismotettonica alla scala 1:250.000 RER.

La necessità di definire lo spessore e le caratteristiche geomeccaniche dei sedimenti in grado di amplificare il moto sismico in superficie, così come di effettuare approfondimenti sugli "effetti cosismici" attesi nel territorio faentino, ha pertanto condizionato il piano di indagini integrative definito per questo studio.

Per quanto riguarda gli ambiti di studio compresi nel contesto di margine appenninico, la loro caratterizzazione sismica complessiva appare più "semplice", in quanto gli areali risultano situati su depositi alluvionali terrazzati sovrastanti il substrato marino plio-pleistocenico delle "Argille Azzurre" e delle "Sabbie Gialle" (Errano; Marzeno; Santa Lucia). Un solo areale di studio è situato su bedrock affiorante (Oriolo dei Fichi), sebbene le indagini integrative abbiano verificato la sua significativa alterazione superficiale.

Per questi ambiti di margine appenninico, i dati geognostici e geofisici di repertorio (sondaggi; penetrometrie statiche o dinamiche; stendimenti MASW; registrazioni HVSR), sono stati esclusivamente integrati da alcune prove penetrometriche dinamiche



superpesanti (DPSH) e da registrazioni dei microtremiti sismici HVSR. Per gli ambiti di margine appenninico si dunque potuto disporre di sufficienti informazioni relative agli spessori di sedimenti amplificabili (alluvioni quaternarie e substrato marino alterato), alle caratteristiche di rigidità e/o velocità di propagazione delle onde sismiche Vs e, infine, alle caratteristiche di rigidità del sottostante bedrock sismico.

In generale, le registrazioni HVSR hanno permesso di accertare la presenza o l'assenza di contrasti di impedenza nei terreni indagati, consentendo la verifica delle determinazioni fatte nello studio del 2009 ed eventualmente di apportare alcuni correttivi. Negli ambiti di margine appenninico, tali misurazioni, correlate con dati stratigrafici o misure di Vs, hanno generalmente permesso di associare i picchi principali di H/V alla profondità del contatto tra i depositi terrazzati e di versante con il substrato, in genere sempre alterato nei primi metri. L'ampiezza di tali picchi, infatti, è direttamente legata alla differenza di velocità degli strati.

Per quanto riguarda gli areali situati nel contesto di pianura, occorre premettere che a tale contesto è stato rivolto il maggior numero di indagini integrative, dedicate a caratterizzare dal punto di vista sismico i maggiori spessori di sedimenti soggetti ad amplificazione e ad analizzare altri "effetti cosismici" (es. liquefacibilità).

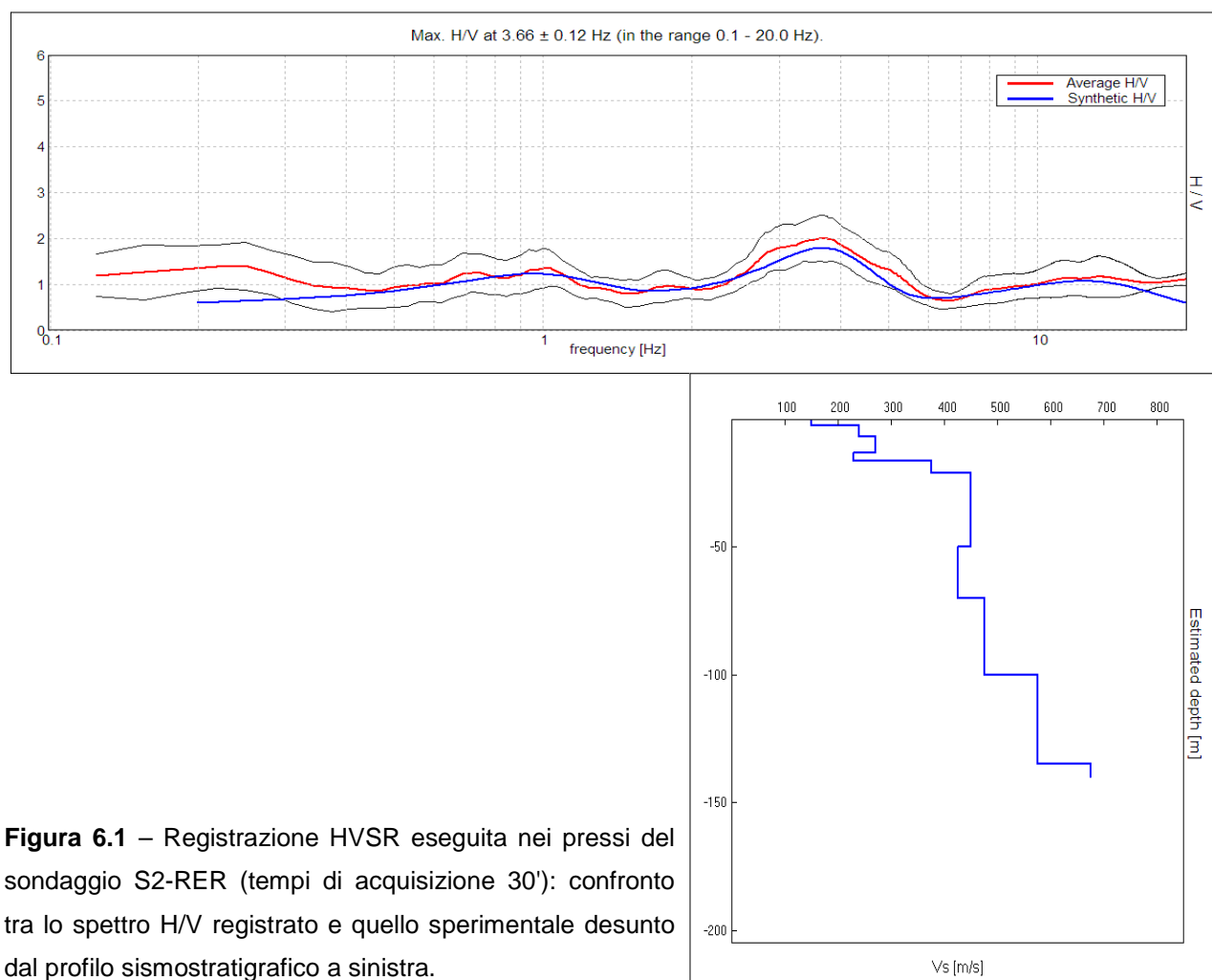
Nel capitolo 5 abbiamo già evidenziato come le registrazioni HVSR consentono di distinguere nella pianura:

- 1) il settore sud-est del Capoluogo, caratterizzato da frequenze naturali del terreno con picchi spettrali massimi a frequenze medio-alte, causate dai contrasti di impedenza tra i sedimenti superficiali fini e le sottostanti ghiaie di conoide);
- 2) il settore sud-ovest Capoluogo, caratterizzato da alti spettrali massimi a frequenze basse (1,15÷1,20 Hz), oppure registrazioni che hanno evidenziato tracce spettrali pressoché "piatte";
- 3) il settore di "media" e "bassa" pianura, caratterizzato da tracce H/V con blandi picchi spettrali a frequenze basse (< 1Hz).

Per quanto riguarda il settore di conoide, le informazioni stratigrafiche dirette, più accurate e profonde, sono riconducibili al sondaggio RER denominato con la sigla "239-S2", che ha raggiunto la profondità di -169,5 metri, attraversando tutto lo spessore alluvionale AES/AEI e parte del sottostante substrato marino pleistocenico (IMO). Le altre informazioni di sottosuolo (pozzi per acqua) conducono alla ricostruzione stratigrafica della struttura di conoide ghiaiosa sepolta riportata nella sezione RER n.63. Dalla citata sezione, si evince come le sequenze ghiaiose della conoide nel settore sud-est del Capoluogo sovrastino a loro volta un più profondo e potente spessore alluvionale prevalentemente fine, attribuito al subsistema superiore indifferenziato (AES<sub>ind</sub>) e al sottostante sistema inferiore (AEI).

Le sequenze ghiaiose meno profonde (cicli AES8 e AES7) della conoide del Fiume Lamone sono state investigate da sondaggi e da ben quattro indagini sismiche “Down-Hole”, che hanno consentito una buona definizione delle velocità delle onde sismiche di taglio  $V_s$  fino ad una profondità di circa -30 metri. Infine, lo stendimento ESAC eseguito anch'esso nel Capoluogo (via Cimabue), ha permesso di stimare con buona attendibilità la  $V_s$  dei sedimenti di conoide più distale (sedimenti meno grossolani) fino ad una profondità di circa -70 metri. Tutte queste informazioni, hanno permesso l'elaborazione di profili sismostratigrafici, in seguito implementati nel software SHAKE 2000 per l'elaborazione di modelli numerici monodimensionali della risposta sismica locale (vedi capitolo 7).

In questo senso, si è potuto ricostruire un profilo di  $V_s$  anche per il sondaggio “239-S2”, basato sul confronto tra le tracce H/V registrate nei pressi della terebrazione e i possibili spettri H/V sperimentali. Gli esiti hanno indicato come probabile bedrock sismico il tetto del banco ghiaioso verso la base delle alluvioni AEI, individuato a 135 metri di profondità (figura 6.1).



**Figura 6.1** – Registrazione HVSR eseguita nei pressi del sondaggio S2-RER (tempi di acquisizione 30'): confronto tra lo spettro H/V registrato e quello sperimentale desunto dal profilo sismostratigrafico a sinistra.

Ciò detto, i modelli sismostratigrafici rappresentativi del contesto di conoide sepolta del Lamone sono stati approfonditi fino a considerare un bedrock sismico impostato tra la

base delle alluvioni dell'unità AES indistinto e il tetto dei depositi marini pleistocenici ("Sabbie Gialle"). Si rammenta che a tale substrato marino (in particolare alle litofacies argilloso-sabbiose) vengono generalmente attribuite Vs <800 m/s.

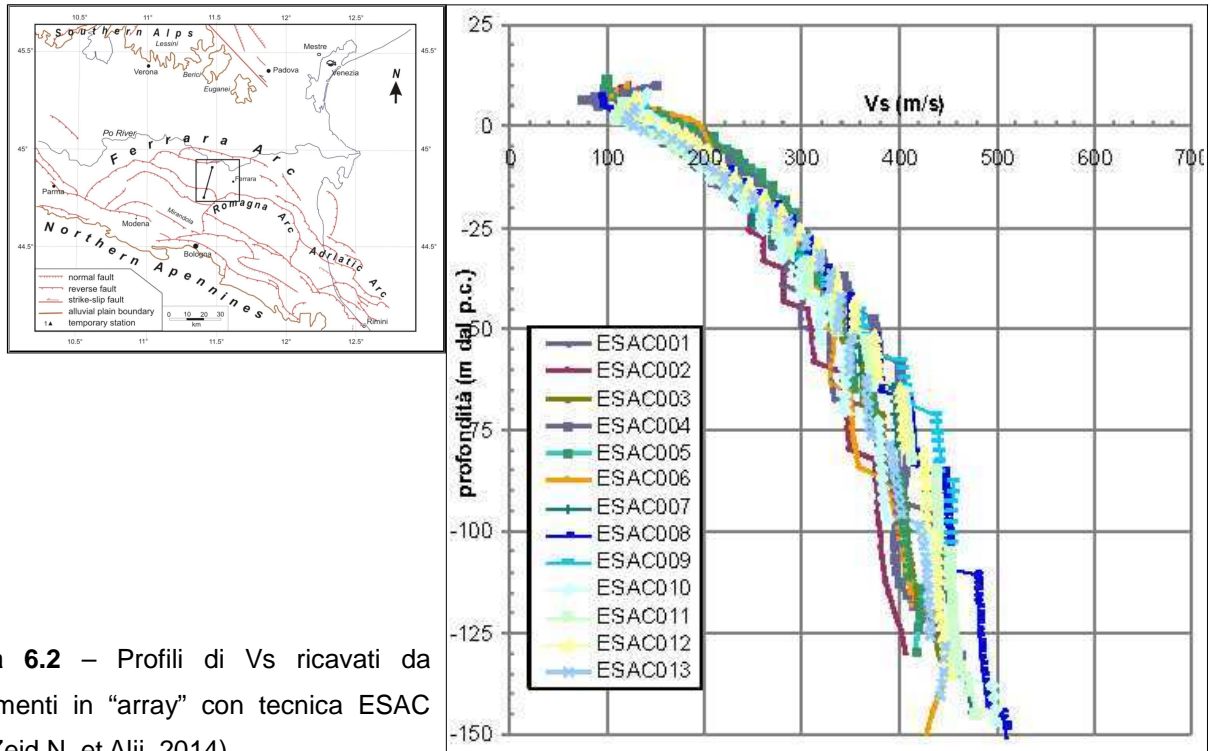
Per quanto riguarda il settore di "media" e bassa" pianura, le registrazioni HVSR effettuate per questo studio (vedi capitolo 5) hanno evidenziato spettri H/V sostanzialmente omogenei tra loro, con blande amplificazioni riscontrabili a basse frequenze che si riducono da 0,90 a 0,70 Hz verso NE. Questi risultati spettrali possono essere correlabili con l'assenza di significativi riflettori sismici superficiali e/o con effetti di smorzamento significativi che si possono attendere nel caso di potenti spessori di sedimenti "soffici" (>100 metri). Con probabilità, possono anche essere correlati con la presenza di un bedrock sismico non marcatamente rigido rispetto ai sovrastanti sedimenti amplificabili.

In questo senso, si rammenta che i pozzi AGIP di interesse per la pianura faentina (vedi capitolo 5) hanno attraversato il sottostante substrato marino plio-pleistocenico, costituito da sedimenti prevalentemente fini (argille prevalenti; sabbie fini argillose con intercalazioni di argille marnose). In particolare, il pozzo "Cotignola n.25" localizzato a sud di Granarolo Faentino, individua il limite tra depositi alluvionali e substrato marino a circa -300 metri. Peraltro, mancano dati in merito all'effettiva rigidità dei sedimenti marini sepolti a tale profondità. Sulla base delle considerazioni litologiche sopra accennate, si presume che tali sedimenti siano ancora caratterizzati da un modesto grado di rigidità (Vs <800 m/s?).

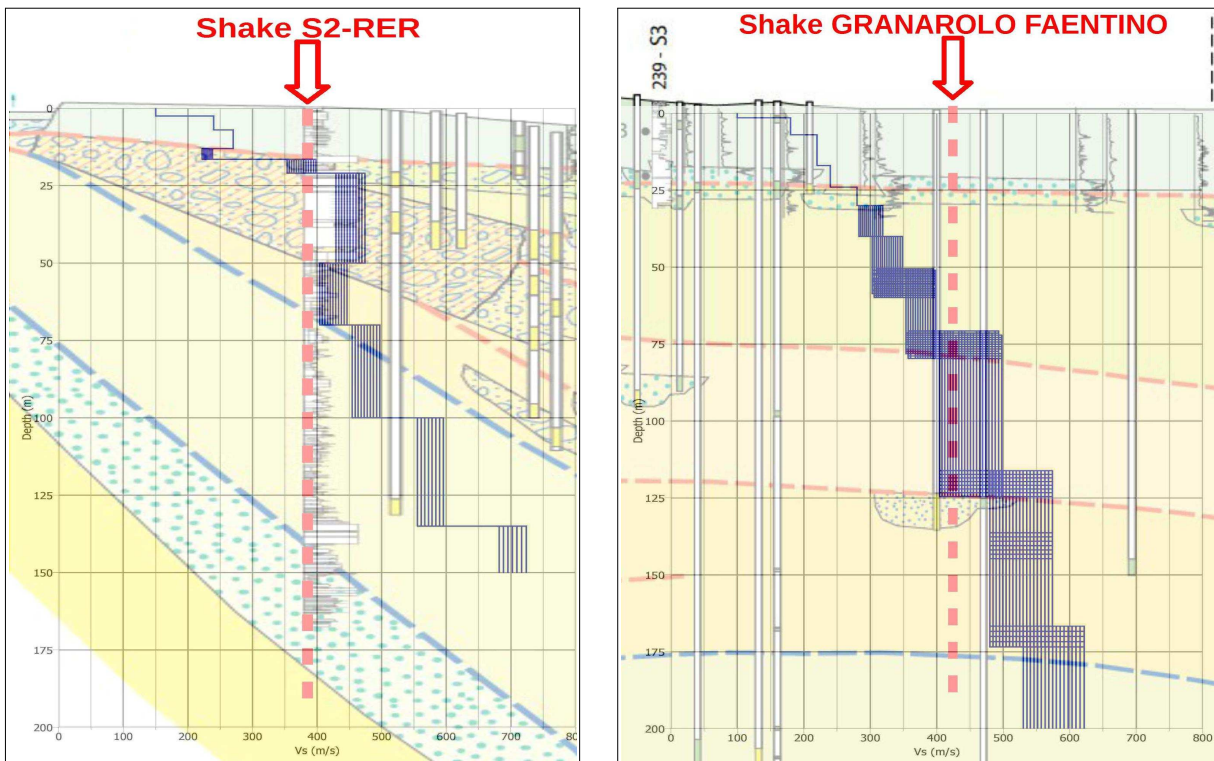
Recenti studi geofisici profondi, effettuati nella pianura tra Cento e Bondeno<sup>5</sup> hanno permesso di ricostruire profili di Vs fino a oltre -150 metri. Tali studi, evidenziano il rapido incremento delle velocità delle onde sismiche di taglio nei sedimenti alluvionali meno profondi e di età deposizionale relativamente recente (cicli deposizionali "AES8", "AES7" e "AES6") e attribuiscono ai sedimenti alluvionali profondi circa -150 metri valori di Vs compresi tra 400 e 500 m/s circa (figura 6.2). Tali esiti sono ben confrontabili con i risultati dell'ESAC eseguita nella "bassa" pianura faentina (per quanto riguarda i sedimenti fino a circa 80 metri di profondità). Si presume che il rapido incremento della rigidità nei sedimenti alluvionali superficiali prevalentemente fini (caratterizzati da una limitata "storia litogenica"), sia principalmente da attribuirsi alle condizioni di incremento del carico litostatico dei sedimenti sepolti più compressibili. Inoltre, nei settori di "bassa" pianura, l'assenza di forti contrasti litologici può determinare chiare difficoltà a definire i limiti dei cicli deposizionali e quindi a individuare dei marcati contrasti di impedenza.

---

<sup>5</sup>"Acquisition of Vs profiles across the Casaglia anticline - Ferrara Arc" (Abu-Zeid N. et Alii, Protezione Civile Nazionale – INGV, 2014)



**Figura 6.2** – Profili di Vs ricavati da stendimenti in “array” con tecnica ESAC (Abu-Zeid N, et Alii, 2014).



**Figura 6.3** – Sovrapposizione tra sezione geologica profonda (sez. RER n. 63) e colonna sismostratigrafica dei due modelli numerici random “S2-RER” e “Granarolo Faentino” descritti nel capitolo 7 (si riporta la variabilità delle Vs con la profondità).

Ciò detto, i modelli sismostratigrafici elaborati per gli areali di “media” e “bassa” pianura hanno considerato uno spessore di sedimenti alluvionali suscettibile di amplificazione la cui profondità varia tra il limite basale del ciclo “AES6” e la base delle sottostanti unità “AES” indistinto. Si è pertanto considerato un “pseudobedrock” sismico, caratterizzato da Vs variabili da 525 a 625 m/s, collocato a profondità comprese tra -145 a -185 metri. Si tratta pur sempre di approssimazioni, che tengono conto degli aspetti litostratigrafici di base (sezioni RER; sondaggi profondi; indagini geofisiche). È chiaro che, nella “bassa pianura”, sarebbero auspicabili ulteriori e specifici studi per definire con maggior chiarezza la presenza di contrasti di impedenza significativi ancora più profondi (es. tra limite delle alluvioni AEI e bedrock marino).

Come meglio descritto nel capitolo 7, le simulazioni numeriche di RSL sviluppate per questo studio hanno considerato una certa variabilità dei modelli sismostratigrafici di riferimento (profondità, spessore e rigidità dei sismostrati). In questo senso, la figura 6.3 propone le colonne sismostratigrafiche dei due modelli di RSL caratteristici del sondaggio “S2-RER” (conoide del Lamone) e della frazione Granarolo Faentino.

## 6.2 Liquefacibilità e altri effetti cosismici

L'analisi della liquefacibilità dei sedimenti, se sottoposti a sollecitazioni cicliche indotte da terremoti, è di fondamentale importanza per gli aspetti di progettazione geotecnica antisismica. In particolare, occorre valutare, nel modo più adeguato possibile, le effettive condizioni di suscettibilità, le condizioni di innesco e il rischio sito specifico di tale fenomeno.

Con il termine “liquefazione” si indicano vari fenomeni fisici (mobilità ciclica, liquefazione ciclica, fluidificazione) osservati durante terremoti significativi (generalmente per magnitudo  $M > 5.5$ ) nei depositi sabbiosi saturi e fini poco coesivi di piana o di pendio; in questi sedimenti, le condizioni “non drenate” durante il sisma possono indurre un incremento e un accumulo delle pressioni interstiziali, che a loro volta possono provocare una drastica caduta della resistenza al taglio e quindi una perdita di capacità portante del terreno. Il meccanismo di liquefazione dei sedimenti è governato da molti fattori che si possono ricondurre principalmente:

- alle caratteristiche dell'impulso sismico (forma; durata dello scuotimento; ecc.) e della sua energia (magnitudo; accelerazioni; ecc.);
- alle caratteristiche tessiturali e meccaniche dei sedimenti (fuso granulometrico; densità relativa; coesione; limiti di Atterberg; ecc.);
- alla presenza di falda superficiale e alle condizioni di confinamento dello strato liquefacibile (non sono riportati casi in letteratura di liquefazione in strati granulari profondi oltre 15-20 metri).

La differenza fra i diversi fenomeni dipende dalle tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche e dalla resistenza al taglio residua dopo il terremoto.

In condizioni di sisma, vi possono anche essere effetti di “riordino” dei sedimenti, con possibilità di cedimenti significativi che possono coinvolgere sia i depositi granulari, sia i sedimenti fini poco coesivi. Nell'ultimo decennio, sono state elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma, provocate da perdite di resistenza, anche nei sedimenti fini (limi e argille a comportamento “non drenato”). Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine “cyclic softening” (Idriss & Boulanger, 2004 e 2008).

Fenomeni di liquefazione si sono chiaramente manifestati con gli eventi sismici emiliani del maggio 2012, tuttavia non si sono riscontrati i fenomeni più critici riconducibili a fluidificazione (con perdita della capacità portante del terreno dei sedimenti al di sotto delle costruzioni) e neppure scorrimenti significativi nelle scarpate degli argini; anche i cedimenti rilevati degli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni<sup>6</sup>. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica e in particolare ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche on line nel sito del SGSS).

Il lavoro svolto per questo studio ha consentito un approfondimento relativamente alle condizioni di suscettibilità alla liquefazione dei sedimenti del territorio studiato, sulla base delle esperienze scientifiche maturate anche in Emilia-Romagna a seguito degli eventi sismici del maggio 2012. In questo senso, ci si è basati:

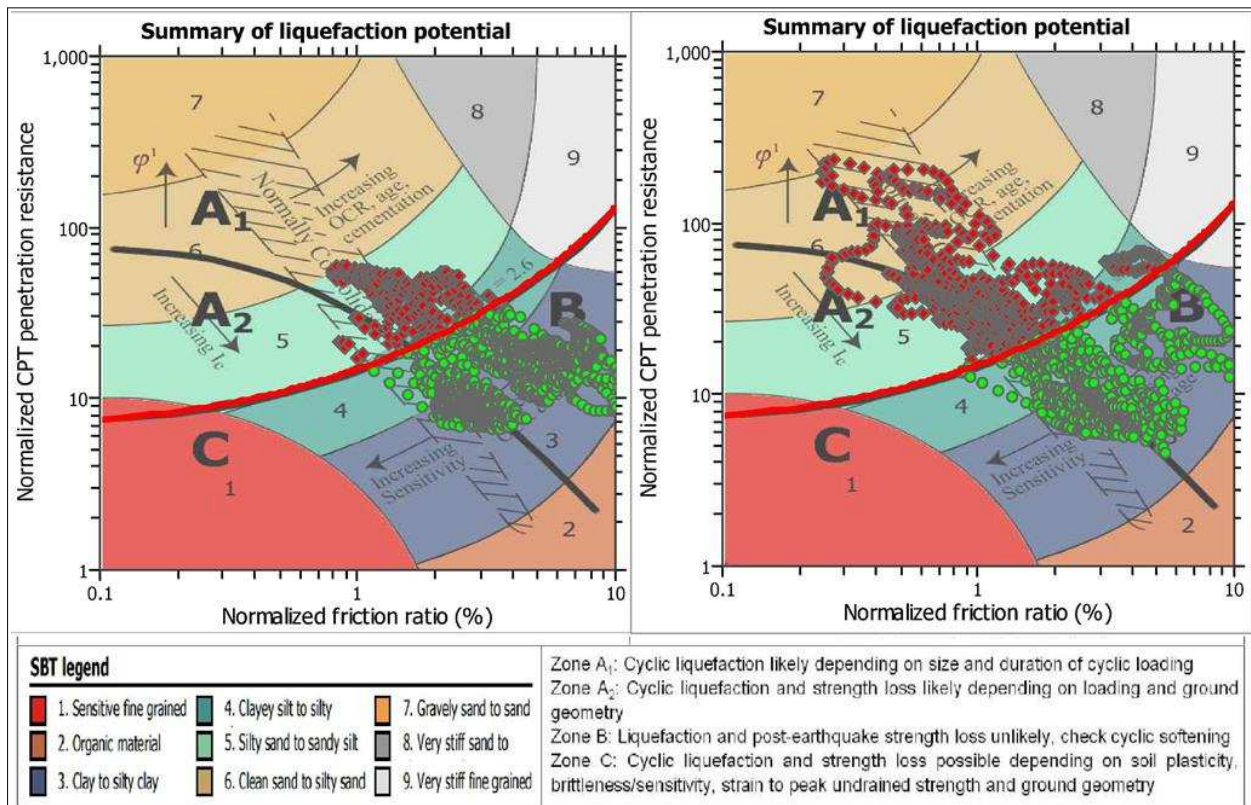
- sui dati di sottosuolo desunti dalle prove geognostiche disponibili (sondaggi e prove penetrometriche);
- sulla caratterizzazione idrogeologica e in particolare sulla ricostruzione della soggiacenza media della falda meno profonda (basata sui rilievi idrogeologici eseguiti per il solo territorio di Faenza).

Per quanto riguarda i dati di sottosuolo, gli accertamenti risultano più accurati soprattutto nelle zone urbane dove, per ovvi motivi, si concentrano le indagini geognostiche. Occorre precisare che si è potuto disporre di pochi dati direttamente ricavati da 5 sondaggi di repertorio (fusi granulometrici; limiti si Atterberg; prove di taglio; ecc.) oltre al sondaggio eseguito per questo lavoro (Piazzale Giani); per questo motivo, ci si è basati soprattutto sull'interpretazione delle indagini penetrometriche: grafici delle resistenze e dati numerici. I dati numerici disponibili di 30 prove CPTU hanno consentito una migliore interpretazione degli intervalli tessiturali potenzialmente liquefacibili, rispetto alla sola analisi dei diagrammi plottati su cartaceo. I dati numerici, infatti, consentono un'analisi della suscettibilità basata anche sulla classificazione di comportamento dei sedimenti proposta da P.K. Robertson (1990; 2009): in questo senso, la figura 6.4 mostra gli esiti di due prove CPTU rappresentative della zona Capoluogo<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup>Fonte: "Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012", C. Crespellani et Al., 2012.

<sup>7</sup>Idendificabili nell'archivio delle indagini geognostiche con le sigle P6CPTU8 e P4CPTU5.



**Figura 6.4** – Plottaggio degli esiti penetrometrici sulla Carta della classificazione di P.K. Robertson (1990; 2009).

Le zone A1 e A2 evidenziate nel diagramma, corrispondono ai sedimenti di bassa coesione, attribuibili a comportamento granulare e suscettibili di liquefazione ciclica; in particolare, i sedimenti che ricadono nella zona A2 risultano più suscettibili a perdite anche significative di resistenza in caso di sisma. Le Zone B e C ( $I_c > 2,6$ ) corrispondono invece ai terreni coesivi a comportamento argilloso. Per i sedimenti ricadenti nella zona B la liquefazione risulterebbe improbabile, mentre entrambe le zone (B e C) potrebbero comprendere sedimenti sensibili a “cyclic softening” (Boulanger & Idriss, 2004), in particolare i sedimenti che ricadono nella zona C risultano più suscettibili a liquefazione ciclica e a perdite significative di resistenza in funzione della plasticità, sensibilità e resistenza di taglio intrinseca. Come si evince dalla figura 6.4, le prove rappresentano differenti situazioni riscontrabili nel territorio studiato e cioè:

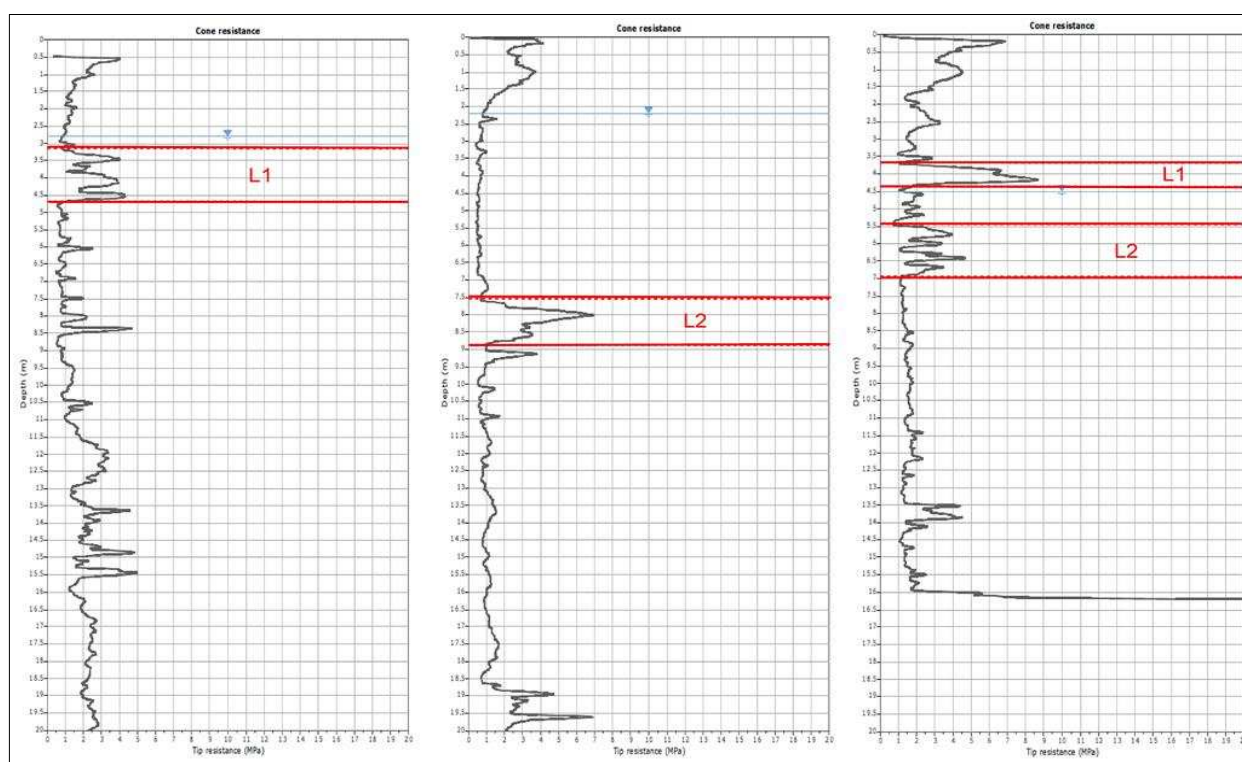
- sedimenti granulari e/o poco coesivi attribuibili alle zone A2 e A1 (questi ultimi prevalenti);
- con sedimenti fini attribuibili prevalentemente alla zona B e in minor misura alla zona C (si riscontrano livelli classificabili come depositi organici, caratterizzati da basse resistenze di punta).

Sulla base di quanto detto, le prove penetrometriche delle quali si è potuto disporre dei soli diagrammi delle resistenze in formato cartaceo, sono state interpretate per individuare intervalli potenzialmente liquefacibili. Per il territorio di Faenza, si è potuto disporre di oltre 300 punti di controllo complessivi.

Si è valutato di discriminare due differenti intervalli (layer) di verifica, rispettivamente fino a 0÷10 metri e 10÷20 metri. Ciò ha permesso di “pesare” maggiormente le prove che riscontrano livelli potenzialmente liquefacibili nei primi 10 metri, intervallo generalmente ritenuto più suscettibile alla liquefazione, con maggiori evidenze in termini di manifestazioni superficiali (condizioni free-field) e in termini di interazione con eventuali fondazioni dirette (le più diffuse) di manufatti.

Si sono infine classificate le prove (figure 6.5 e 6.6), prendendo come riferimento la procedura già adottata dal SGSS regionale per gli studi di microzonazione sismica<sup>8</sup> nei Comuni maggiormente danneggiati dagli eventi sismici del maggio e giugno 2012. Il controllo delle indagini ha dunque permesso di distinguere le seguenti classi tessiturali:

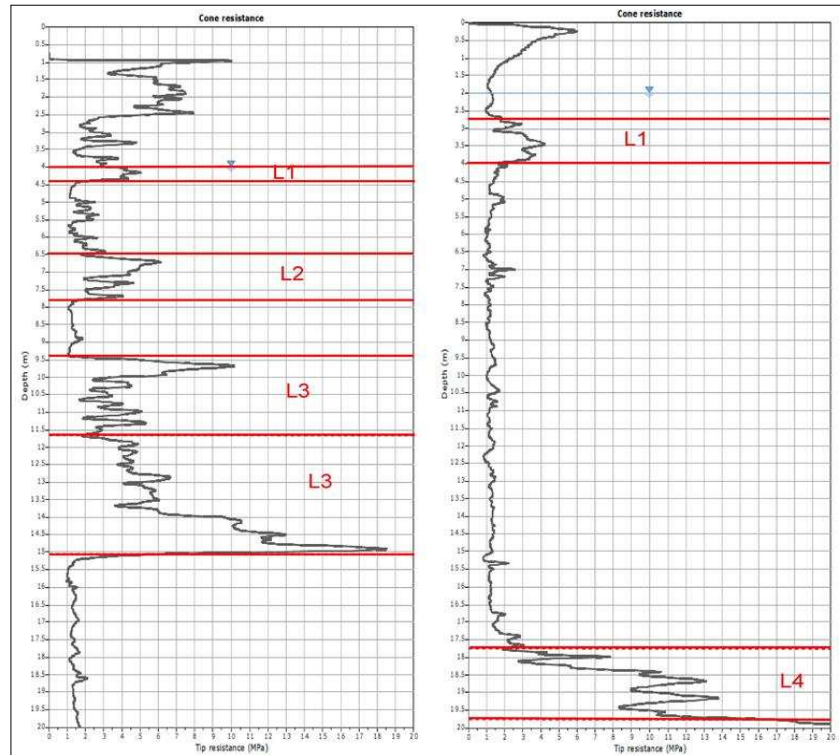
PROFONDITA'	CLASSI TESSITURALI DI SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE
LAYER 0÷10 metri	L1 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >40 cm sotto falda e nei primi 5 metri
	L2 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >100 cm tra 5 e 10 metri
LAYER 10÷20 metri	L3 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >200 cm tra 10 e 15 metri
	L4 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >200 cm tra 15 e 20 metri



**Figura 6.5** – Esempi di classificazione tessiturale di prove penetrometriche per l’identificazione delle condizioni predisponenti la liquefazione : classi “L1”, “L2”, “L1 + L2”.

<sup>8</sup>Vedi tavole MOPS elaborate per i Comuni ai sensi dell’Ordinanza del Commissario delegato n. 70/2012).





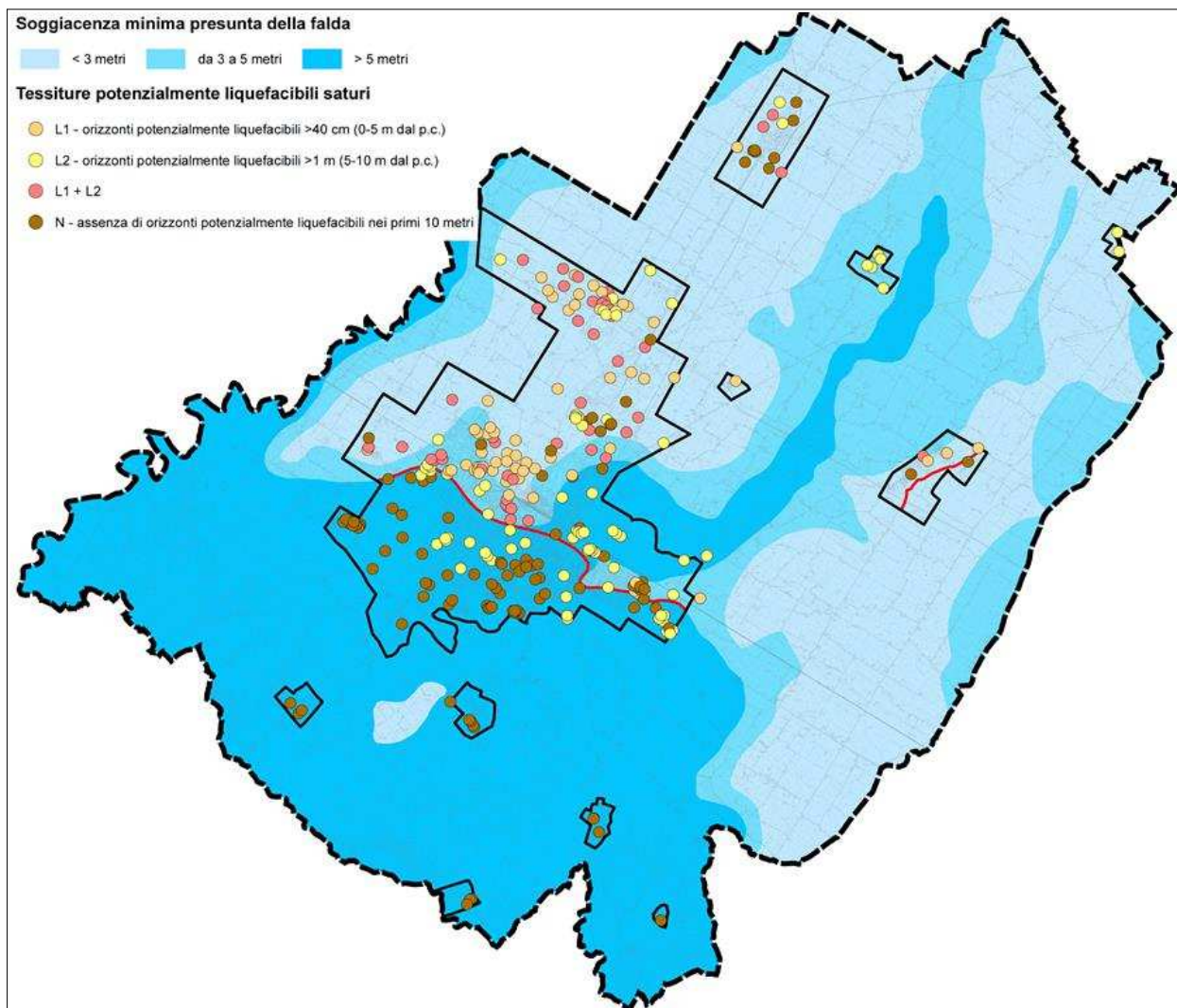
**Figura 6.6** – Esempi di classificazione tessiturale di prove penetrometriche per l'identificazione delle condizioni predisponenti la liquefazione: classi “L1”, “L2”, “L3” e “L4”.

Risultano 220 prove che hanno raggiunto o superato la profondità di profondità di -10 metri (il 73% circa delle indagini complessive), mentre soltanto 69 prove (il 23% circa) hanno raggiunto o superato i -20 metri di profondità. È dunque chiaro come le interpretazioni relative al layer più profondo risultino inficiate da maggiori incertezze.

La figura 6.7 riporta la classificazione dei punti di controllo in termini di suscettibilità alla liquefazione (fino a -10 metri) e sovrappone lo schema idrogeologico semplificato del territorio Faentino. La figura riporta anche il limite della zona di attenzione sopra indicato.

In conclusione, il controllo tessiturale finalizzato alla definizione della suscettibilità alla liquefazione porta a classificare la stragrande maggioranza delle terebrazioni situate nella porzione centro-settentrionale del territorio comunale come “suscettibile alla liquefazione”. Si tratta di una classificazione che può considerarsi cautelativa, ma che giustifica la necessità di ulteriori approfondimenti sulla questione liquefacibilità, in parte già affrontati con questo studio (vedi capitolo 7), ma che non esulano i Professionisti dall'effettuare ulteriori analisi sito-specifiche.

La maggior parte dei punti di controllo “non suscettibili” risultano invece concentrati a sud, per la presenza di tessiture prevalentemente ghiaiose e per le maggiori soggiacenze della falda. Il confronto tra esiti tessiturali e il contesto idrogeologico locale ha quindi consentito di delimitare la parte centro settentrionale del territorio comunale come una complessiva “zona di attenzione per liquefazioni”, in coerenza con gli standard di rappresentazione per gli studi di microzonazione sismica (v.3.0).



**Figura 6.7** – Classificazione tessiturale dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefacibilità (sottosuolo fino a 10 metri di profondità) e soggiacenze della falda meno profonda. La linea continua rossa demarca il territorio comunale classificabile come “zona di attenzione per liquefazioni” (a nord della linea).

## 7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Il fine ultimo di uno studio di microzonazione sismica di secondo livello è quello di pervenire ad una suddivisione del territorio indagato in zone “stabili”, zone “suscettibili di amplificazioni locali”, a loro volta suddivise in aree a diverso grado di amplificazione, e zone “instabili”. Per Faenza e Solarolo, lo studio espletato ha permesso un aggiornamento delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) già individuate nella precedente microzonazione sismica (Marabini, 2009) e un ulteriore approfondimento (terzo livello) in merito agli aspetti di risposta sismica locale e di liquefacibilità dei sedimenti. I paragrafi del presente capitolo illustrano i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione sul territorio, per identificare le aree instabili e, per quanto riguarda la potenziale liquefacibilità dei sedimenti di pianura, di fornire ulteriori elementi quantitativi per le valutazioni dell'effettivo grado di rischio.

### 7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali – fattori di amplificazione semplificati

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, devono essere calcolati, nel secondo livello di microzonazione sismica, i fattori di amplificazione, scegliendo se utilizzare gli abachi nazionali degli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008) o quelli di riferimento regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007). Nel presente studio la scelta è caduta su questi ultimi, in analogia con quanto realizzato nello studio di microzonazione del 2009 (Marabini, 2009) e poiché si ritiene che, per come sono strutturati, consentano una migliore e più corretta modellazione per lo specifico caso dell'Unione dei Comuni della Romagna Faentina.

Si rammenta che i fattori di amplificazione di riferimento per la Regione Emilia-Romagna sono i seguenti:

- $FA_{PGA}$  → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione su affioramento rigido e la massima ampiezza dell'accelerazione alla superficie del deposito. Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento  $D$  e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito;
- $FA_{SI}$  - Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità; la DAL regionale n.114/2007 considera i fattori di amplificazione per i due intervalli di frequenze, rispettivamente  $0.1 < T_0 < 0.5$  s ( $FA_{0,1-0,5s}$ ) e  $0.5 < T_0 < 1$  s ( $FA_{0,5-1,0s}$ ).

La prima scelta da fare, per poter determinare i fattori di amplificazione ( $FA_{PGA}$ ,  $FA_{0,1-0,5s}$ ,  $FA_{0,5-1s}$ ) secondo i criteri regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007), è quella relativa a quali abachi utilizzare. A questo proposito vale la pena di citare un breve estratto dell'allegato C della DGR 1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013):

*Si ricorda che la scelta degli abachi per la stima dell'amplificazione non dipende dalle sole caratteristiche litologiche e morfologiche dell'area, ma deve essere attentamente valutata sulla base delle caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo, in particolare della profondità del substrato rigido. Per questa valutazione si raccomanda di porre particolare attenzione alla cartografia di primo livello, in particolare alla carta delle MOPS e degli elementi geologici sepolti che possono modificare il moto in superficie e alla carta delle frequenze naturali dei terreni.*

Per quanto riguarda il Comune di Faenza, sulla base di quanto riportato nei precedenti capitoli 5 e 6 e in particolare per le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo ritenute importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, il territorio studiato è attribuibile ai seguenti abachi rappresentativi della stima della risposta sismica locale semplificata:

- A2.1.1 - Appennino e margine appenninico-padano ( $V_s$  substrato < 800 m/s)

Utilizzato per gli areali ricadenti nel contesto di fondovalle del Fiume Lamone (Errano) e del Torrente Marzeno (Marzeno e S. Lucia), ove risultano coperture alluvionali sovrastanti bedrock marino "non rigido" ("Argille Azzurre" FAA e/o "Sabbie Gialle" IMO caratterizzate da  $V_s < 800$  m/s).

Questo abaco è stato utilizzato anche per il settore meridionale del Capoluogo, comprendente parte della conoide terrazzata del Lamone e piana di fondovalle ove si sono registrate le massime amplificazioni spettrali H/V a frequenze medio/alte, per la presenza di depositi amplificabili più fini sovrastanti le ghiaie più grossolane e addensate di conoide e il substrato marino pleistocenico.

Questo abaco è stato utilizzato anche per l'areale di Oriolo dei Fichi in quanto, sebbene il substrato marino risulti dalla cartografia geologica regionale affiorante, le indagini integrative hanno evidenziato uno spessore di sedimenti molto alterato fino a circa 20 metri.

- A2.1.2 - Pianura Padana e Costa Adriatica (PIANURA 1, substrato < 120 m da p.c.)

Utilizzato sia nella porzione sud occidentale di piana terrazzata ("alta" pianura) del Capoluogo, sia nell'areale di piana terrazzata intravalliva di Pettinara, in cui il substrato sismico, sulla base dei dati disponibili, è collocato a profondità inferiori ai 120 metri.

- A2.1.2 - Pianura Padana e Costa Adriatica (PIANURA 2, substrato  $\geq$  120 m da p.c.)

Utilizzato nella restante parte del Capoluogo che risulta insediato sui depositi della conoide medio-distale del Lamone e negli ambiti situati nella "media e "bassa" pianura, in cui sono presenti più limitati orizzonti ghiaiosi intercalati a successioni di sabbie e peliti e il substrato si trova a profondità superiori ai 120 metri.

Si noti che rispetto a quanto indicato negli abachi degli indirizzi regionali, il limite di profondità del substrato per distinguere tra Pianura 1 e Pianura 2 è stato cautelativamente

posto a 120 metri anziché a 100, in analogia con quanto definito nello studio di microzonazione dell'area epicentrale del terremoto del 2012 coordinato dal SGSS della Regione Emilia-Romagna (Martelli, 2013).

Rispetto a quanto determinato nello studio di microzonazione del 2009 (Marabini, 2009), nei settori di margine appenninico sono sostanzialmente applicabili gli stessi abachi, con alcune differenze nelle perimetrazioni delle zone e nelle attribuzioni delle velocità dei depositi (capitolo 8). Per gli areali comprendenti l'abitato storico di Faenza, che in precedenza era interamente attribuito alla "Pianura 1" un'ampia parte di questo settore è stato attribuito al contesto di "Pianura 2" in relazione ai dati disponibili di sottosuolo e al bedrock sismico collocabile a profondità superiori ai 120 metri. Occorre inoltre precisare che le informazioni di sottosuolo disponibili per i settori di pianura hanno consentito l'elaborazione di modelli numerici di risposta sismica locale. Gli esiti di tali modelli sono stati assunti come riferimento delle relative zone omogenee MOPS, come verrà descritto nei successivi paragrafi.

È opportuno sottolineare come, in ragione della diversa distribuzione e qualità dei dati disponibili e delle inevitabili incertezze dei metodi utilizzati in questo genere di valutazioni, non siano tanto importanti i valori assoluti dei fattori di amplificazione ottenuti, quanto piuttosto quelli relativi ricavati dal confronto dei diversi valori numerici, che permettono di individuare le aree a maggiore o minore pericolosità relativa.

Si evidenzia che per i rilievi modesti riscontrati negli areali di studio del Comune di Faenza, il valore del coefficiente di amplificazione topografica  $S_t$  è stato assunto ovunque pari a 1.

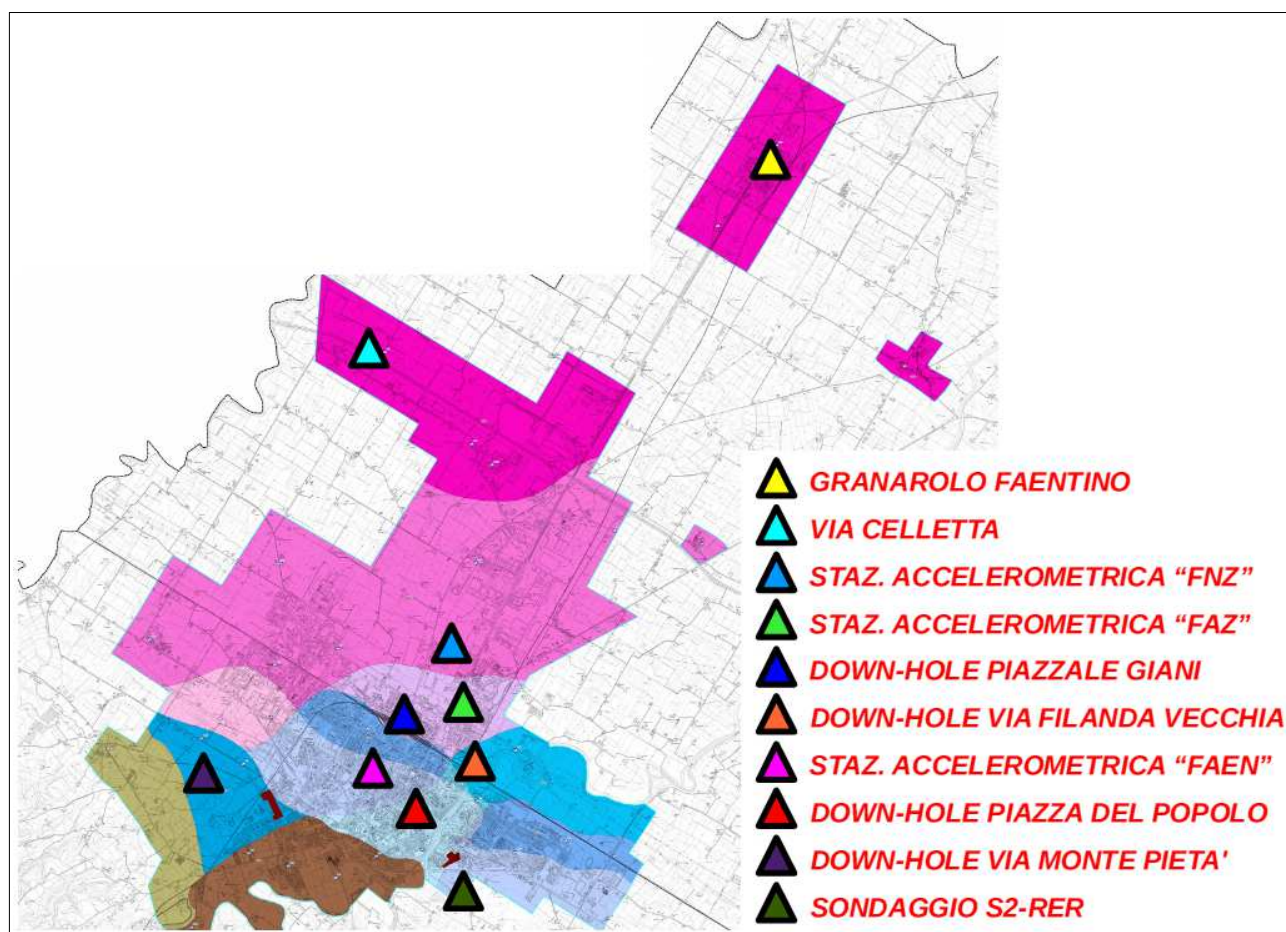
## **7.2 Zone suscettibili di amplificazioni locali – modelli numerici di amplificazione**

Le informazioni di sottosuolo pregresse e di nuova acquisizione hanno consentito di espletare ulteriori approfondimenti sulla risposta sismica locale (RSL), finalizzata a quantificare anche gli effetti di amplificazione indotti dal sisma. Si è pertanto deciso di espletare alcune analisi di modellazione numerica della RSL, localizzate in funzione dei punti d'indagine disponibili di maggior importanza (es. sondaggi, prove "Down-Hole", "Coni sismici" ecc.), basate sui dati di sottosuolo e sulle relative interpretazioni già descritti nei capitoli 5 e 6. Complessivamente, sono state elaborate 10 analisi numeriche monodimensionali, localizzate nelle figure 7.1 e 7.2 che hanno interessato i settori di "Pianura 1" (in particolare l'"alta" pianura a SO del Capoluogo) e di "pianura 2" (conoide, "media" e "bassa" pianura) attribuiti al Comune di Faenza.

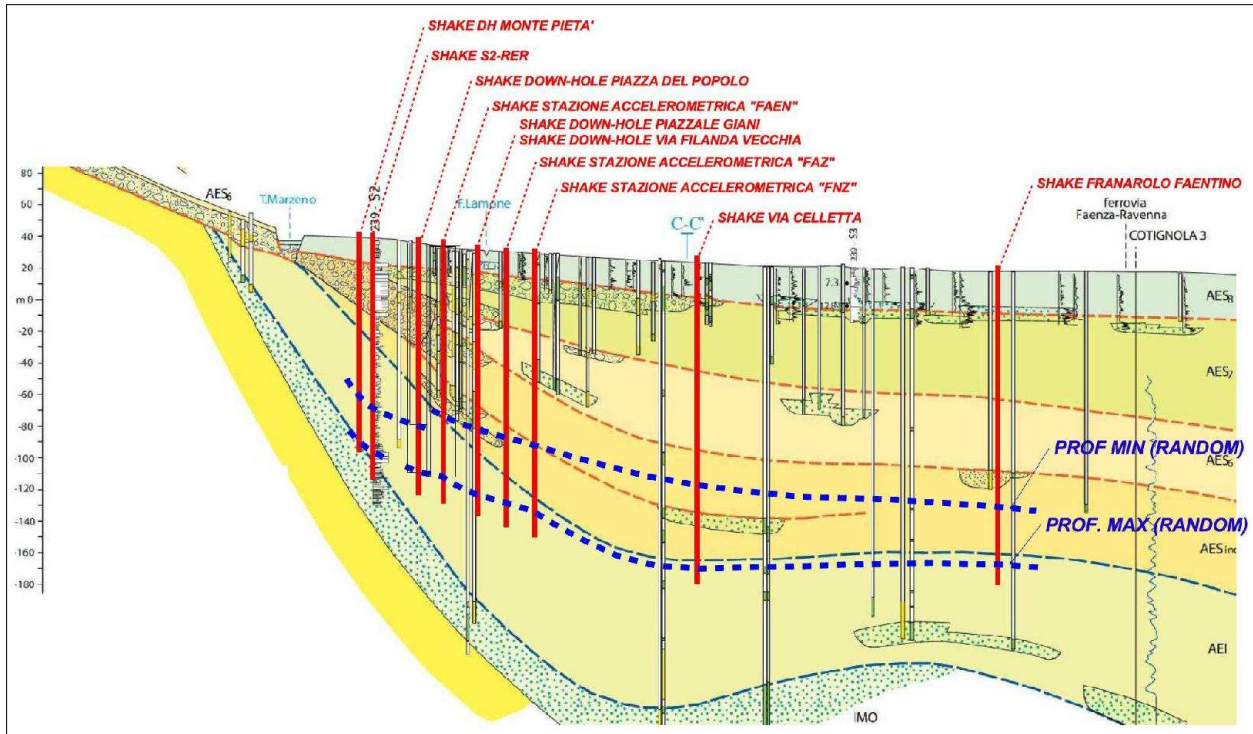
Le analisi numeriche di RSL sono state elaborate secondo l'approccio analitico lineare equivalente, utilizzando il noto software SHAKE 2000 (v. 3.2.0). SHAKE 2000 è un programma di calcolo realizzato per verifiche monodimensionali e sviluppato da P.B. Schnabel; J. Lysmer e H.B. Seed dell'Università di Berkeley (USA). Il software è in grado

di eseguire una sequenza di analisi lineari complete, con l'aggiornamento successivo dei parametri di rigidità e smorzamento in funzione delle caratteristiche della colonna litologica. Il processo di analisi che si è seguito può essere così schematizzato (figura 7.3):

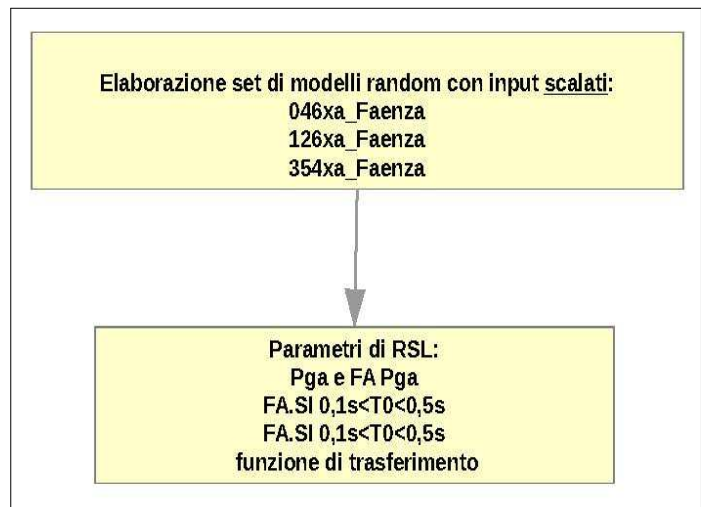
- ✓ scelta degli input sismici (accelerogrammi) di riferimento in funzione della pericolosità sismica di base indicata per questo studio di microzonazione sismica;
- ✓ definizione del modello sismostratigrafico locale;
- ✓ elaborazione degli accelerogrammi di output e degli spettri di risposta richiesti.



**Figura 7.1** – Localizzazione delle analisi numeriche di RSL elaborate per questo studio. La figura riporta le MOPS aggiornate del Comune di Faenza.



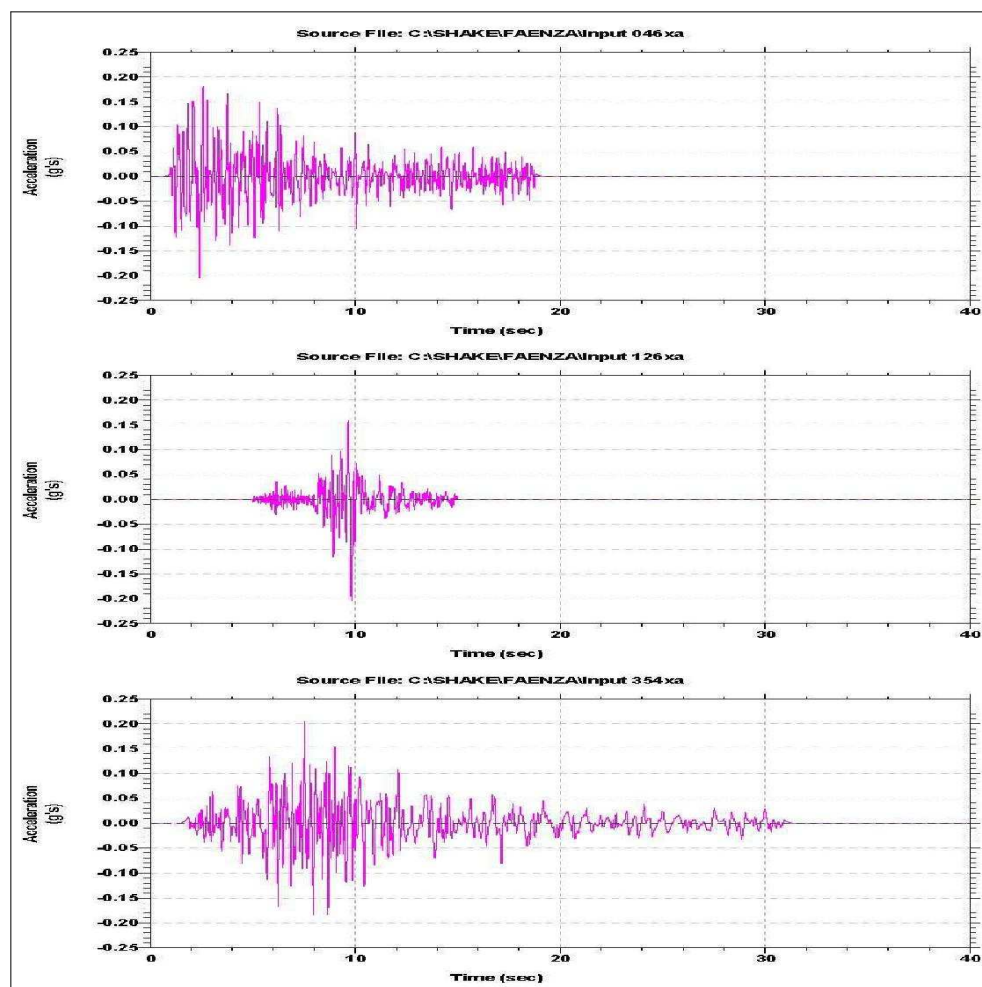
**Figura 7.2** – Localizzazione delle analisi numeriche espletate sulla sezione geologica RER n.63. La figura riporta le profondità del pseudo-bedrock considerate per la modellazione.



**Figura 7.3** – Diagramma di flusso delle analisi che hanno condotto agli esiti di RSL.

Le elaborazioni numeriche sono state impostate sui tre accelerogrammi di riferimento, forniti dalla Regione Emilia-Romagna, selezionati dalla Banca Dati accelerometrica ISESD attraverso una procedura che valuta la similarità tra la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali. Si tratta di tre differenti tipologie di segnale (figura 7.4):

- 1) impulsivo
- 2) con ampio contenuto in frequenze
- 3) con componente predominante alle alte frequenze.



**Figura 7.4** – Accelerogrammi di riferimento per il Capoluogo, utilizzati per la modellazione numerica di RSL.

La  $Pga_0$  di riferimento al suolo rigido indicata nella DAL regionale n.112/2007 è stata confrontata con la  $Pga_0$  di riferimento attualmente vigente a scala nazionale, calcolata alla medesima pericolosità di base<sup>9</sup> e definita mediante griglia di calcolo INGV costruita per tutto il territorio italiano: ne risulta una buona similarità per tutti i modelli elaborati nel Capoluogo, mentre per i modelli localizzati nel territorio comunale più settentrionale (“Granarolo Faentino” e “via Celletta”) si riscontrano valori lievemente differenti. Per questo motivo si è valutato, con approvazione del SGSS regionale, di utilizzare accelerogrammi di input differentemente scalati e cioè:

- ✓ per le simulazioni eseguite nell'area Capoluogo →  $Pga_0 = 0,205g$
- ✓ per le simulazioni eseguite in via Celletta (zona produttiva a nord del Capoluogo) →  $Pga_0 = 0,201g$
- ✓ per le simulazioni eseguite nella frazione Granarolo Faentino →  $Pga_0 = 0,193g$

Definiti gli input di scuotimento, il codice di calcolo SHAKE 2000 richiede l'inserimento del modello sismostratigrafico rappresentativo dell'area di studio. In questo senso, è necessario definire:

<sup>9</sup>Evento sismico con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.



- ✓ numero e spessore degli strati di sottosuolo, profondità del bedrock sismico
- ✓ proprietà elastiche per ogni strato ( $V_s$  o modulo di taglio massimo  $G_0$ )
- ✓ leggi di variazione normalizzata di  $G$  e rapporti di smorzamento minimo  $D_0$  per ogni strato

Il successivo passo è dunque quello di definire la stratigrafia e i relativi principali parametri sismici. Il supporto conoscitivo, per quanto riguarda il sottosuolo è fornito dagli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite nell'area di studio e dalle ulteriori indagini di repertorio. La figura 7.2 riporta in forma schematica le profondità del "bedrock sismico" considerato per tutti i modelli numerici, mentre per le ulteriori considerazioni si rimanda a precedenti capitoli 5 e 6.

Occorre precisare che l'attribuzione dei sismostrati meno profondi è basata su valutazioni indirette, desunte dagli esiti penetrometrici e dalle valutazioni dirette ricavate dalle prove di laboratorio su campioni di sedimenti effettuate per questo lavoro (classificazione; limiti di Atterberg; colonna risonante).

Per ogni sismostrato, il codice di elaborazione implementato in SHAKE 2000, richiede l'inserimento delle fondamentali proprietà dinamiche del suolo, rappresentate dal fattore di smorzamento  $D$  e dal modulo di rigidezza a taglio  $G$ . Mentre i valori di rigidezza iniziale  $G_0$  sono stati determinati sulla base delle indagini geofisiche (stima delle  $V_s$ ), le caratteristiche di deformazione a taglio e smorzamento dei sedimenti sottoposti a sollecitazioni impulsive devono essere necessariamente determinate da prove di laboratorio. In tal senso, di fondamentale importanza sono risultati gli esiti della prova di "colonna risonante" (figura 7.5), effettuata sul campione di sedimenti fini (argille con  $IP \cong 40$ ) prelevati a  $-17,3 \div 17,8$  metri nel sondaggio del Capoluogo (Piazzale Giani), rappresentativo di alcuni intervalli mediamente plastici riscontrabili nel sottosuolo Faentino. Per le altre situazioni litologiche, sono stati adottati modelli disponibili in letteratura, già implementati dal programma SHAKE 2000. In particolare, si sono considerati gli esiti delle curve di decadimento di Seed & Idriss (1970) per sabbie, Vucetic & Dobry (1991) per sedimenti argillosi rispettivamente e ancora di Seed et al. (1986) per le ghiaie (figura 7.6).

Le simulazioni numeriche della RSL sono state elaborate secondo un approccio per iterazione, in conseguenza della variabilità del modello di sottosuolo, fino a raggiungere una convergenza degli esiti di amplificazione ritenuti il più possibile compatibili con le reali caratteristiche sismostratigrafiche del sito studiato. Inoltre, Tutte le simulazioni hanno preliminarmente considerato un modello di riferimento. È comunque da rimarcare l'ineludibile incertezza che risiede nella definizione e nella esemplificazione dei principali parametri sismostratigrafici del modello di riferimento, rispetto all'effettiva situazione reale, soprattutto per la caratterizzazione degli strati più profondi.

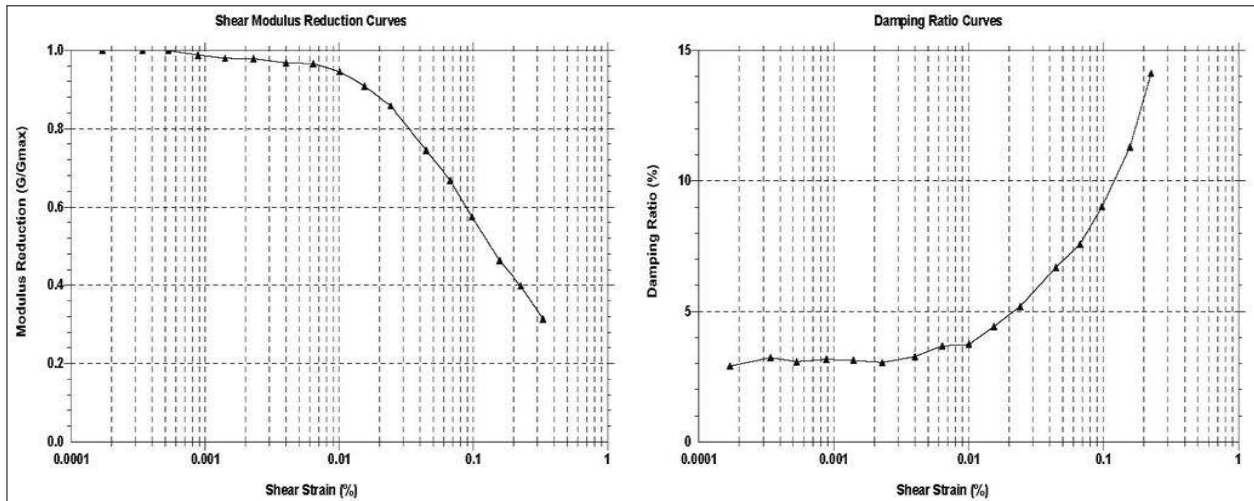


Figura 7.5 – Proprietà dinamiche dei materiali: curve di decadimento ricavate dalla prova di colonna risonante (argille IP ≈40). Il campione indisturbato è stato prelevato alla profondità di 17,0÷17,8 m nel sondaggio eseguito nel Capoluogo (Piazzale Gianni).

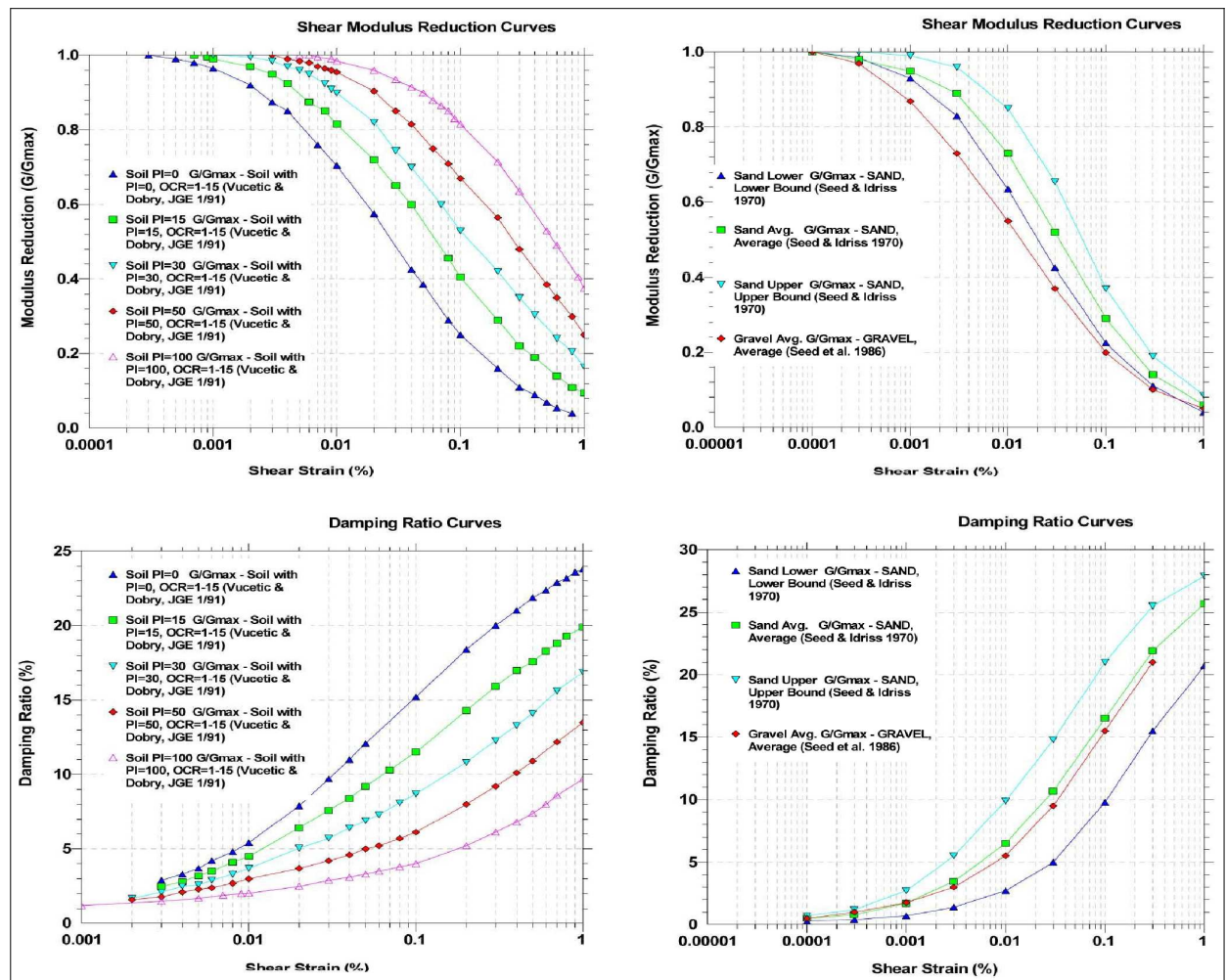
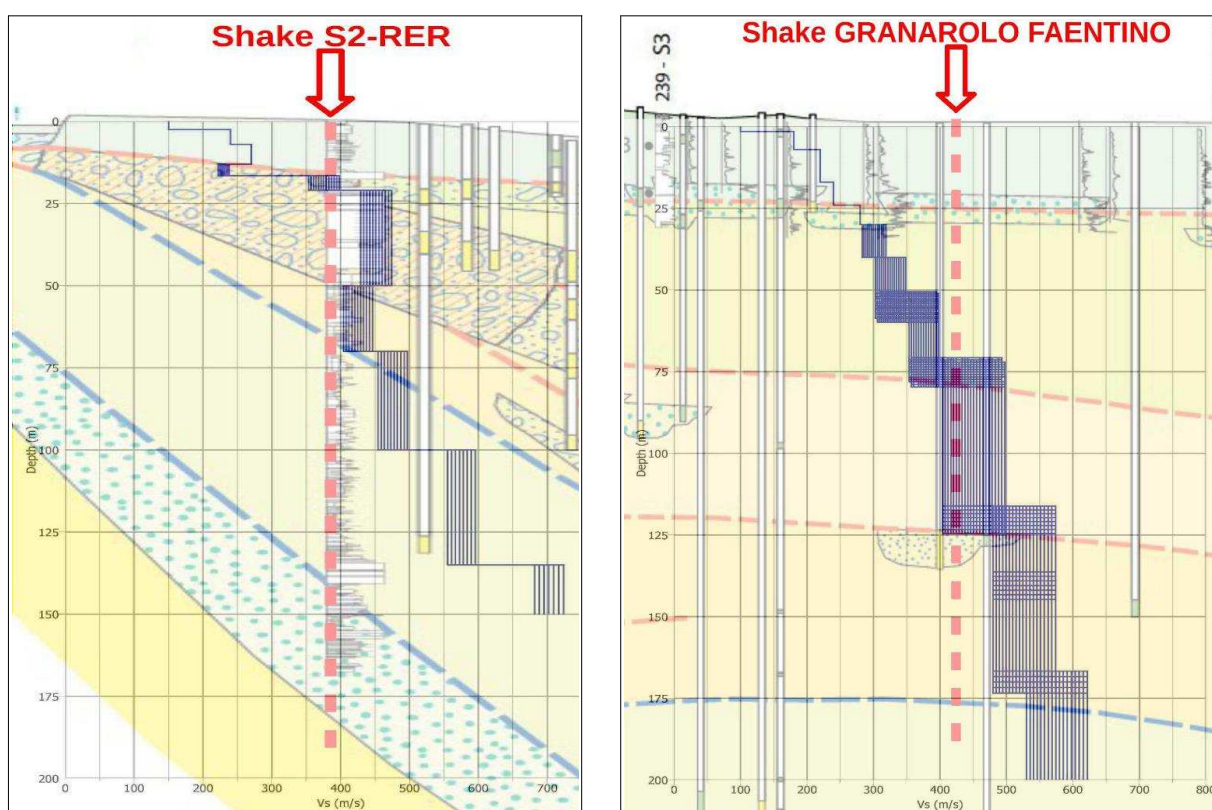


Figura 7.6 – Proprietà dinamiche dei materiali: ulteriori curve di decadimento sperimentali considerate per le analisi numeriche di RSL.

In tal senso, il programma SHAKE 2000 permette di generare casualmente un set di simulazioni numeriche considerando la variabilità del modello sismostratigrafico di riferimento (limite base, limite superiore e spessore degli strati; moduli di taglio; damping; accelerazione di picco; velocità onde sismiche di taglio; ecc.). Occorre rammentare che tale funzionalità di SHAKE 2000 deve essere considerata come un ulteriore strumento analitico per valutare gli effetti di variabilità dei dati di input sui risultati delle analisi di RSL.

L'approccio di calcolo utilizzato per questo lavoro ha previsto l'utilizzo della funzione "Stratified/Random Field" implementata nel software. Questo metodo consente di scegliere il numero di modelli random da generare, impostando per ogni intervallo della colonna sismostratigrafica di riferimento i limiti di variabilità dei parametri selezionati. È inoltre possibile vincolare la generazione dei modelli ad una profondità compresa tra i valori minimi e massimi della colonna sismostratigrafica così definita. Ciò detto, l'approccio di calcolo random è impostato prevedendo 100 modelli sismostratigrafici differenti, con limiti della profondità del pseudobedrock e con velocità delle onde sismiche di taglio  $V_s$  (dunque di rigidezza) ragionevolmente variabili.



**Figura 7.7** – Sovrapposizione tra sezione geologica profonda (sez. RER n. 63) e colonna sismostratigrafica dei due modelli numerici random "S2-RER" e "Granarolo Faentino" (si riporta la variabilità delle  $V_s$  con la profondità).

In sintesi, i modelli sismostratigrafici random della "media" e "bassa" pianura (corrispondenti alla zona produttiva di Faenza e Granarolo Faentino) hanno considerato

come riflettore sismico predominante (pseudobedrock sismico) un intervallo di sedimenti compresi tra il limite basale AES6 e la base delle sottostanti alluvioni dell'unità AES indistinto (figure 7.2 e 7.7).

I modelli rappresentativi del contesto di conoide sepolta del Lamone (ove si insedia gran parte dell'insediato storico di Faenza) hanno invece considerato un riflettore sismico predominante impostato tra la base delle alluvioni dell'unità AES indistinto e il tetto del Bedrock marino pleistocenico ("Sabbie Gialle"). In particolare, per i modelli numerici random corrispondenti al sondaggio profondo S2-RER si è considerato come bedrock sismico il tetto di una potente successione ghiaiosa (rilevato a -125 metri), sovrastante il substrato roccioso marino e al quale si è attribuita una  $V_s$  variabile da 625 m/s a 725 m/s (figura 7.7).

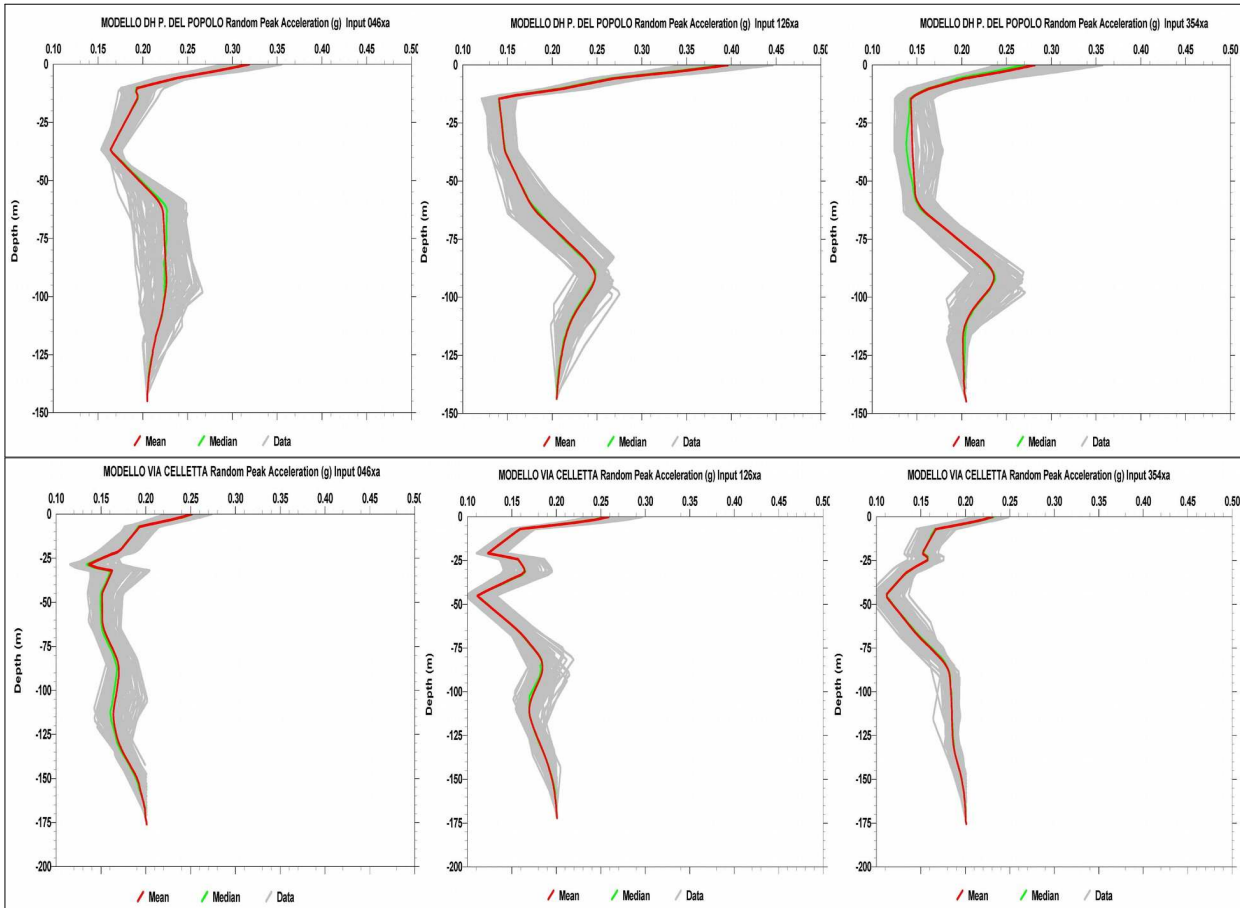
Per quanto riguarda gli esiti di output ricavati dalle modellazioni numeriche, il software SHAKE 2000 consente di valutare i parametri di risposta sismica indicati dalla DAL regionale n. 112/2007. In particolare si sono calcolati:

- A) le accelerazioni di picco al suolo e i valori di  $Fa_{pga}$
- B) i rapporti spettrali di amplificazione
- C) l'intensità spettrale di Housner e i valori di  $FA SI_{(0,1-0,5s)}$  e  $FA SI_{(0,5-1,0s)}$

*A) Accelerazioni di picco al suolo e valori di  $Fa_{pga}$*

Le simulazioni numeriche consentono la valutazione dell'amplificazione locale  $Fa_{pga}$  intesa come rapporto dell'accelerazione massima calcolata nello strato più superficiale o di interesse (in questo caso calcolata al suolo) rispetto all'accelerazione di riferimento al bedrock "rigido". Il software SHAKE 2000 consente di calcolare la variabilità della  $ag$  attraverso le colonne sismostratigrafiche random. In questo senso, le schede di sintesi dei modelli numerici random allegate in calce alla Relazione riportano graficamente l'andamento delle accelerazioni orizzontali (media e mediana) per i tre input sismici di riferimento (figura 7.8) e la tabella con i valori rappresentativi di  $Pga$  e di  $FA Pga$ .

Si precisa che, per limitare le eventuali anomalie nella distribuzione degli esiti di amplificazione generate dalle simulazioni random, si è ritenuto più corretto utilizzare il valore di mediana come esito di riferimento per ognuno dei tre input sismici. Il valori di  $Pga$  e  $FA Pga$  al suolo assunti come rappresentativi per la RSL sono infine ricavati come valore medio dei tre esiti di mediana.

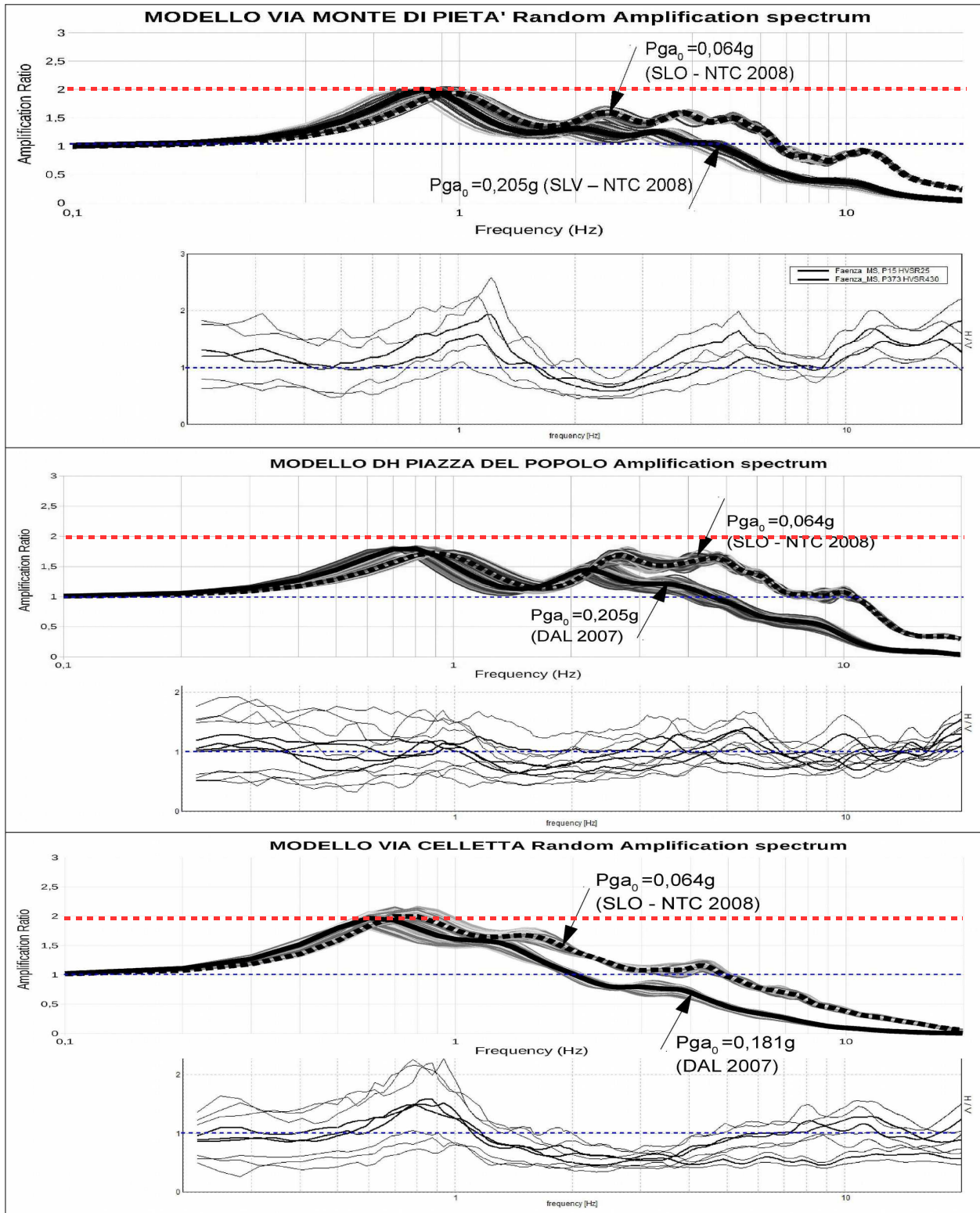


**Figura 7.8** – Distribuzione delle accelerazioni orizzontali di RSL per i tre input sismici di riferimento (in alto: modelli “Piazza del Popolo”; in basso: modelli “via Celletta”).

### *B) Rapporti spettrali di amplificazione*

La risposta sismica locale deve essere valutata anche in funzione delle amplificazioni del moto di vibrazione in termini di frequenze dell'impulso sismico, considerando i fattori di smorzamento  $D$  e i rapporti tra le impedenze sismiche dei sismostrati. La variazione del fattore di amplificazione con la frequenza definisce la funzione di amplificazione  $A(f)$  della colonna sismostratigrafica. Il moto sismico può dunque essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali di vibrazione della colonna stratigrafica. In questo senso, è molto importante definire la prima frequenza naturale di vibrazione  $f_0$  denominata frequenza fondamentale, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore che dovrebbe risultare il massimo.

Le schede di sintesi delle modellazioni di RSL riportano gli spettri di amplificazione generati dalle simulazioni random (set di valori e valore di mediana) per gli input sismici considerati.



**Figura 7.9** – Confronto tra funzioni di trasferimento ricavate con differenti livelli energetici di scuotimento sismico e spettri di amplificazione H/V ottenuti dalle registrazioni tromografiche al suolo. Gli esempi si riferiscono ai modelli numerici di “via Monte di Pietà” (“alta” pianura terrazzata - “Pianura 1”), “Piazza del Popolo” (conoide Lamone) e “via Celletta” (“bassa” pianura faentina).

Occorre ricordare che la funzione di amplificazione locale non è una proprietà univoca del sito ma è anche dipendente dalle caratteristiche del moto di input (es. ampiezza e contenuto in frequenza, energia, effetti del comportamento non lineare del terreno, ecc.). Per questo motivo, si sono calcolati anche gli spettri di amplificazione ricavati dagli accelerogrammi scalati a valori energetici molto più bassi, ovvero considerando  $Pg_0$  scalati al livello di pericolosità probabilistica dello "Stato Limite Operativo" (SLO) indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti (NTC 2008). Il confronto tra spettri ricavati da differente energia di scuotimento, evidenzia l'influenza della non linearità del comportamento dei sedimenti sulla funzione di amplificazione al crescere dei livelli energetici del terremoto: in generale, si riscontra uno spostamento verso frequenze minori (periodi maggiori) del picco di amplificazione e una sua progressiva attenuazione. Inoltre, per maggiori livelli energetici del terremoto si hanno effetti di attenuazione dell'amplificazione alle alte frequenze. La figura 7.9 riporta, per alcune simulazioni di RSL, entrambi gli spettri di amplificazione ricavati secondo gli input scalati DAL 112/2007 e SLO-NTC2008. La figura 7.9 confronta anche lo spettro di amplificazione H/V ricavato dalle registrazioni tomografiche effettuate nei rispettivi areali, per meglio evidenziare la migliore correlabilità con gli spettri ricavati da sismi a bassa energia.

Si precisa che la modellazione numerica è stata limitata fino ad un massimo di 20 Hz, limite più utile ai fini ingegneristici per le analisi delle interazioni sottosuolo/strutture.

### *C) Intensità spettrale di Housner*

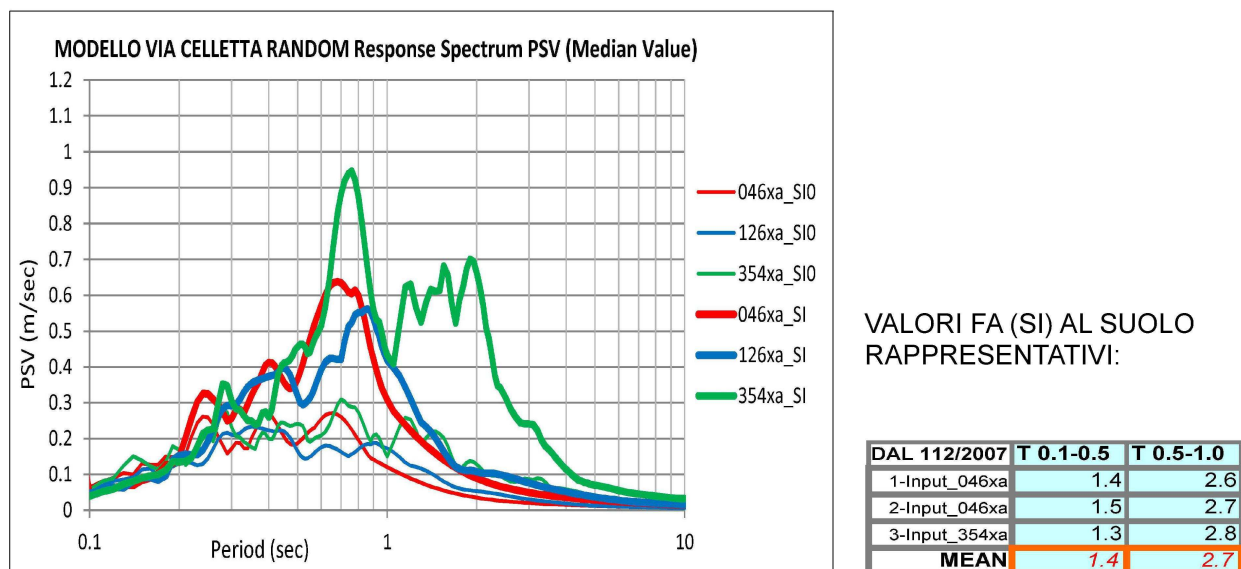
Gli spettri di risposta riflettono solo in maniera indiretta le caratteristiche del moto sismico, essendo queste ultime filtrate attraverso la risposta delle strutture di progetto. Gli spettri di risposta risultano di più significativa utilità ai fini ingegneristici in quanto consentono di rappresentare nella maniera più efficace e utile per l'ingegnere gli effetti delle caratteristiche del moto del terreno sul comportamento delle strutture.

In questo senso, la DAL regionale n.112/2007 richiede la determinazione del fattore di amplificazione FA SI (rapporto di intensità spettrale di Housner) quale ulteriore indicatore della pericolosità sismica. L'intensità di Housner è definita come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità. Nello specifico, la Deliberazione regionale richiede di quantificare i fattori di amplificazione per i due intervalli di frequenze, rispettivamente da  $0.1 < T_0 < 0.5$  s (FA SI<sub>0,1-0,5s</sub>) e da  $0.5 < T_0 < 1$  s (FA SI<sub>0,5-1,0s</sub>).

Le schede di sintesi delle modellazioni di RSL riportano gli esiti spettrali di PSV (SI) per i tre input sismici di riferimento. Sono riportati graficamente tutti gli esiti dei set di colonne sismostratigrafiche random create dal software SHAKE 2000, il valore di media e il valore di mediana (quest'ultimo assunto come esito di riferimento per ognuno dei tre input sismici). È riportato anche il confronto tra gli spettri PSV al pseudobedrock dei tre input sismici (SI<sub>0</sub>) e i rispettivi spettri PSV al suolo (valori di mediana) e gli esiti numerici di FA SI

riferiti al suolo (figura 7.10).

In calce alla Relazione, si riportano le schede di sintesi dei 10 modelli numerici random. Le schede riportano, nel dettaglio, anche i dati di input considerati per la generazione dei modelli sismostratigrafici random.



**Figura 7.10** – Spettri di intensità di Housner riferiti al suolo (SI - valori di mediana) e al pseudobedrock (SI0) ed esiti numerici rappresentativi del FA SI al suolo (modelli numerici di RSL di “via Celletta”).

La sottostante tabella 7.1 riporta, in sintesi, gli esiti di tutte le simulazioni numeriche random di RSL eseguite per gli areali dei Comuni di Faenza e Solarolo.

MOPS	VS	MODELLO SHAKE	FA PGA	FA SI 01_05	FA SI 05_1
2017	Vs20=250	Piazza del Popolo	1.6	2.1	1.8
2018	Vs30=250	DH Filanda Vecchia	1.4	1.7	2.5
2019	Vs30=300	DH via Monte Pietà	1.5	1.8	2.1
2020	Vs30=300	S2-RER	1.6	2.0	2.4
2020	Vs30=300	Staz. Accelerometrica FAEN	1.4	1.7	2.1
2021	Vs30=250	DH Piazzale Giani	1.4	1.7	2.5
		Staz. Accelerometrica FAZ	1.5	1.7	2.3
2022	Vs30=250	Staz. Accelerometrica FNZ	1.3	1.3	2.7
		Solarolo	1.2	1.4	2.4
2023	Vs30=200	Via Celletta	1.2	1.4	2.7
	Vs30=200	Granarolo Faentino	1.2	1.4	2.8

**Tabella 7.1** – Esiti di amplificazione (FA Pga e FA SI) ricavati dalle modellazioni numeriche random elaborate per gli areali dei Comuni di Faenza e Solarolo. Si riportano le MOPS in cui ricadono i modelli e le relative Vs di riferimento.



### 7.3 Verifiche quantitative della liquefacibilità e ulteriori elementi di rischio

La possibilità di disporre di un buon numero di dati numerici di penetrometrie CPTU profonde almeno 20 metri ha permesso di calcolare, per tali prove, il Fattore di Sicurezza nei confronti della liquefazione (FSL) e la stima del parametro LPI (Liquefaction Potential Index), per offrire ulteriori elementi di valutazione del rischio di liquefazione anche alla scala territoriale, per comprovare le analisi suscettibilità precedentemente descritte (capitolo 6) e, infine, per motivare gli ulteriori approfondimenti sismici che, ineludibilmente, si dovranno ancora effettuare per gli studi legati alla pianificazione territoriale e alla progettazione.

Si è pertanto proceduto alla stima del Fattore di Sicurezza nei confronti della Liquefazione (FSL), definito dalla seguente relazione:

$$FSL = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_{\sigma}$$

con:

$CRR_{7,5}$  = resistenza alla liquefazione ciclica (Cyclic Resistance Ratio) dei sedimenti attraversati, ricavata dagli esiti CPT (a punta elettrica), per terremoti di  $M = 7,5$ . La procedura si fonda su equazioni che determinano i valori di CRR dei sedimenti attraversati utilizzando i valori di resistenza alla punta  $q_t$ , corretti per tenere conto delle tensioni litostatiche di confinamento, della differente classificazione dei sedimenti attraversati (contenuto di fine; plasticità; ecc.);

CSR = rapporto di sollecitazione ciclica (Cyclic Stress Ratio) prodotta da un sisma e stimata sulla base di correlazioni empiriche dalle caratteristiche del terremoto, magnitudo e accelerazione tangenziale del suolo ( $a_{max}$ ). Il CSR viene calcolato dalla nota equazione semiempirica proposta da Seed e Idriss (1971) per terremoti di  $M = 7,5$ :

$$CSR = 0.65 \cdot \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot r_d$$

$K_{\sigma}$  = Fattore di correzione per la pressione di confinamento (Overburden Correction Factor);

MSF = Fattore di Scala della Magnitudo (Magnitude Scale Factor) da applicare per sismi con magnitudo diverse da 7,5.

Il valore di FSL è stato determinato mediante calcolo automatico con il noto software "Cliq", sviluppato dalla GeoLogismiki Geotechnical Engineers, che consente di utilizzare differenti metodi di stima di FSL.

Per questo lavoro, si sono considerati i seguenti metodi di calcolo di FSL, tutti di lunga sperimentazione e di ampia diffusione nel campo ingeneristico:

1. procedura NCEER<sup>10</sup> (1996; 1998; 2001)

<sup>10</sup>National Center for Earthquake Engineering Research (USA)

(Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R., and Stokoe, K.H. - *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*)

(G. Zhang, P.K. Robertson, and R.W.I. Brachman - *Estimating Liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground, 2001*)

2. procedura di Idriss & Boulanger (2008)

(I. M. Idriss and R.W. Boulanger - *Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland*)

3. procedura di P. K. Robertson (2009)

(P.K. Robertson - *Performance based earthquake design using the CPT - Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering – from case history to practice, IS-Tokyo, 2009*)

Per la descrizione dettagliata dei metodi si rimanda ai diagrammi di flusso allegati in calce alla relazione e alla letteratura scientifica originaria. Si rammenta che tali approcci differiscono nel calcolo dei parametri di MSF,  $CRR_{7.5}$ ,  $K\sigma$  e  $r_d$  e che i metodi di P.K. Robertson (2009) e di Idriss & Boulanger (2008) sono validi per tutti i tipi di sedimenti, e considerano anche la possibilità di “cyclic softening” nei sedimenti fini poco coesivi. Gli esiti sono inoltre condizionati da altre grandezze: tra queste, il contenuto in fini FC che introduce significative correzioni alla resistenza penetrometrica normalizzata. Per questo lavoro, FC viene stimato sulla base dei metodi di riferimento e in funzione dell'indice di comportamento  $I_c$  ricavato dalla classificazione dei terreni di P.K. Robertson (1990).

Per giungere ad un calcolo speditivo di FSL si sono adottate le seguenti condizioni di input:

- si sono utilizzate le  $P_{ga}$  massime attribuite alle MOPS e riportate nelle tavole 9, ossia le massime accelerazioni al suolo ricavate dagli approfondimenti di Risposta Sismica Locale (modellazioni numeriche). In sintesi, le  $P_{ga_{max}}$  considerate sono variabili da 0,33g a 0,25g in funzione della pericolosità delle microzone omogenee nelle quali ricadono le prove CPTU;
- si è considerato il contesto idrogeologico locale, ben sintetizzato dai rilievi idrogeologici eseguiti per il solo territorio di Faenza (vedi capitolo 6) e ulteriormente confrontato con le quote d'acqua rilevate nei fori di indagine. In sintesi, le soggiacenze considerate in condizioni di sisma sono risultate variabili da 1 a 5 metri in funzione del contesto idrogeologico locale in cui ricadono le prove CPTU;

- si è considerata una magnitudo di input pari a  $M_w = 6,14$  come da zonizzazione macrosismica “ZS9” (vedi capitolo 2, paragrafo 2.1). Il coefficiente correttivo MSF utilizzato è quello di riferimento per i metodi di calcolo utilizzati.

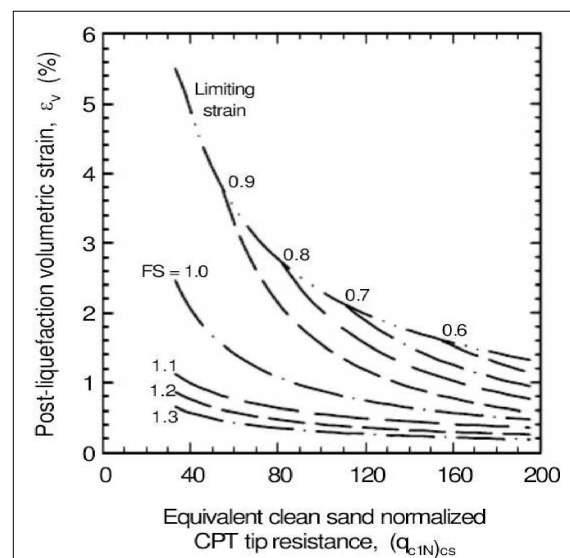
L'Indice di Potenziale Liquefazione LPI (Liquefaction Potential Index) di Iwasaki et al. (1982) è stato calcolato per una profondità “critica” fino a 20 metri di profondità ed è definito nel seguente modo:

$$LPI = \int_0^{20} F_1 W(z) dz$$

[con:  $W(z)$  fattore di peso della profondità  $= 10^{-0.5z}$ ;  $F_1$  variabile  $= 1 - FSL$  (per  $FSL < 1.0$ ) oppure  $F_1 = 0$  per  $FSL > 1.0$ ;  $z$  = profondità dello strato considerato]

Il calcolo fornisce un valore numerico compreso tra 0 e 100 e quantifica i possibili effetti della liquefazione secondo classi di rischio, tenendo conto della severità dell'azione sismica, della profondità, dello spessore e del valore di FSL degli strati liquefacibili.

Per la stima dei cedimenti post sisma nei sedimenti saturi a comportamento granulare, si è proceduto al calcolo automatico secondo il metodo di Zhang et Al. (2002; 2004). Questo procedimento si basa sui risultati empirici di Ishihara & Yoshimine (1992), per sabbie e sedimenti limosi e definisce l'entità delle deformazioni volumetriche post-liquefazione sulla base delle resistenze alla punta ( $q_{c1N}$ )<sub>cs</sub> e dei corrispondenti esiti di FSL (figura 7.11).



**Figura 7.11** – Diagrammi di correlazione tra deformazioni volumetriche post-liquefazione e resistenze CPT per differenti fattori di sicurezza (da Zhang et Al., 2002).

Per i sedimenti a comportamento fine (zone B e C della Carta di classificazione di P.K. Robertson), il cedimento è causato principalmente da fenomeni di riconsolidazione conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto e al manifestarsi di deformazioni da taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche. Generalmente, le deformazioni di riconsolidazione post-sisma sono ritenute molto più piccole di quelle osservate nei sedimenti granulari ed i cedimenti rilevati in seguito a sismi recenti (Loma Prieta; Chi-Chi; Kocaeli) risultano statisticamente modesti anche per potenti

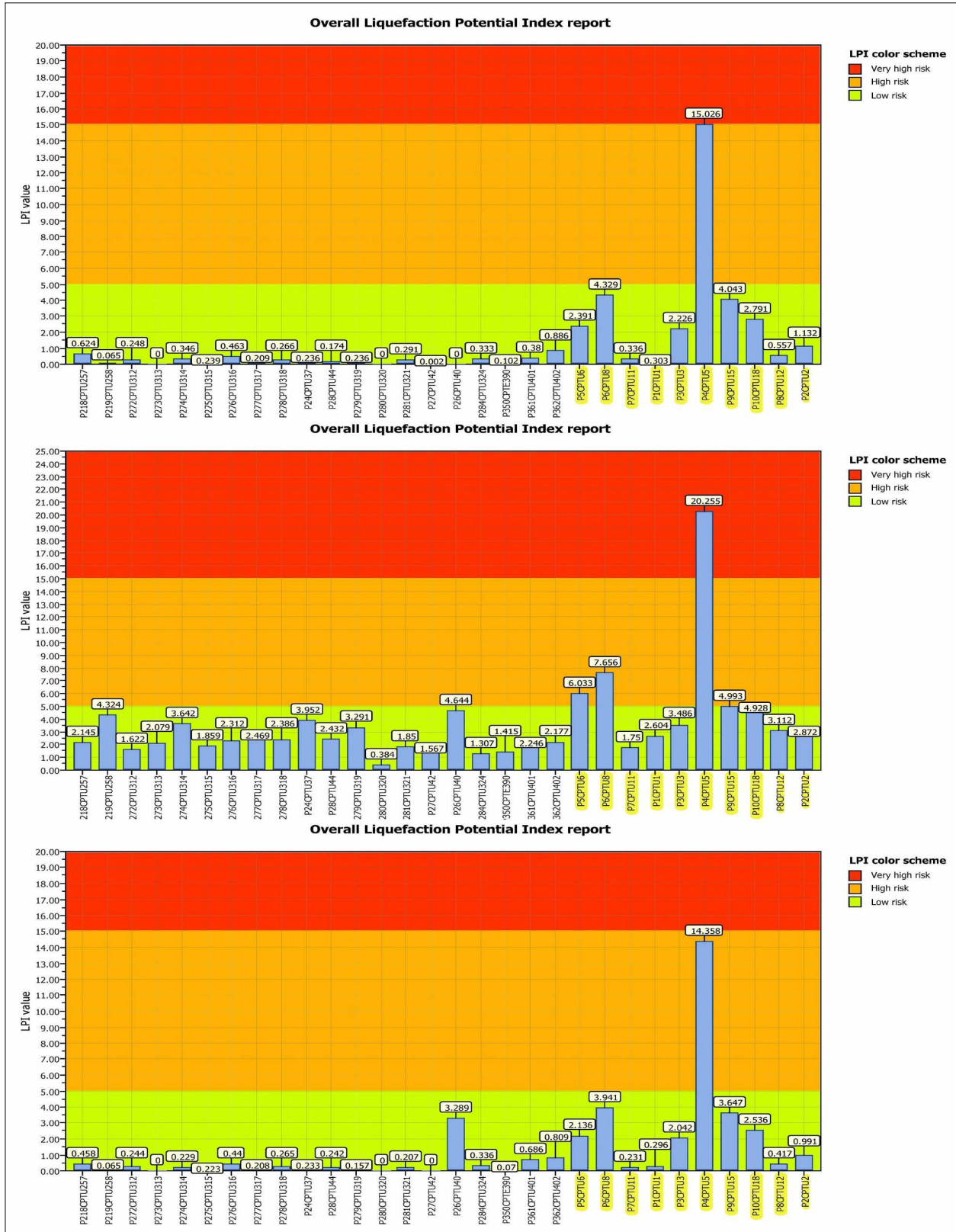
intervalli di depositi di argille compressibili (Boulanger and Idriss, 2007). Secondo quanto riportato nella letteratura scientifica, si reputa che le deformazioni volumetriche medie di strati a grana fine siano contenute entro l'1%. Esperienze empiriche, hanno dimostrato che le deformazioni per riconsolidamento nelle argille sono controllate principalmente dallo sforzo di taglio massimo, funzione di un fattore di sicurezza  $FS_{\gamma=3\%} = CRR_M / CSR_M = CRR_{7,5} / CRS_{7,5}$  (Boulanger & Idriss, 2007) e dello stato tensionale dei sedimenti (OCR). Il fattore di sicurezza è stato dunque calcolato come  $FS_{\gamma=3\%} = CRR_{6,14} / CRS_{6,14}$ . Le deformazioni volumetriche sono state calcolate secondo il metodo di Robertson (2009), utilizzando le seguenti relazioni:

$$\varepsilon_{vol} = [0.8 - 2.66 \log (FS)] / [0.33 A (Q_{in})^3]$$

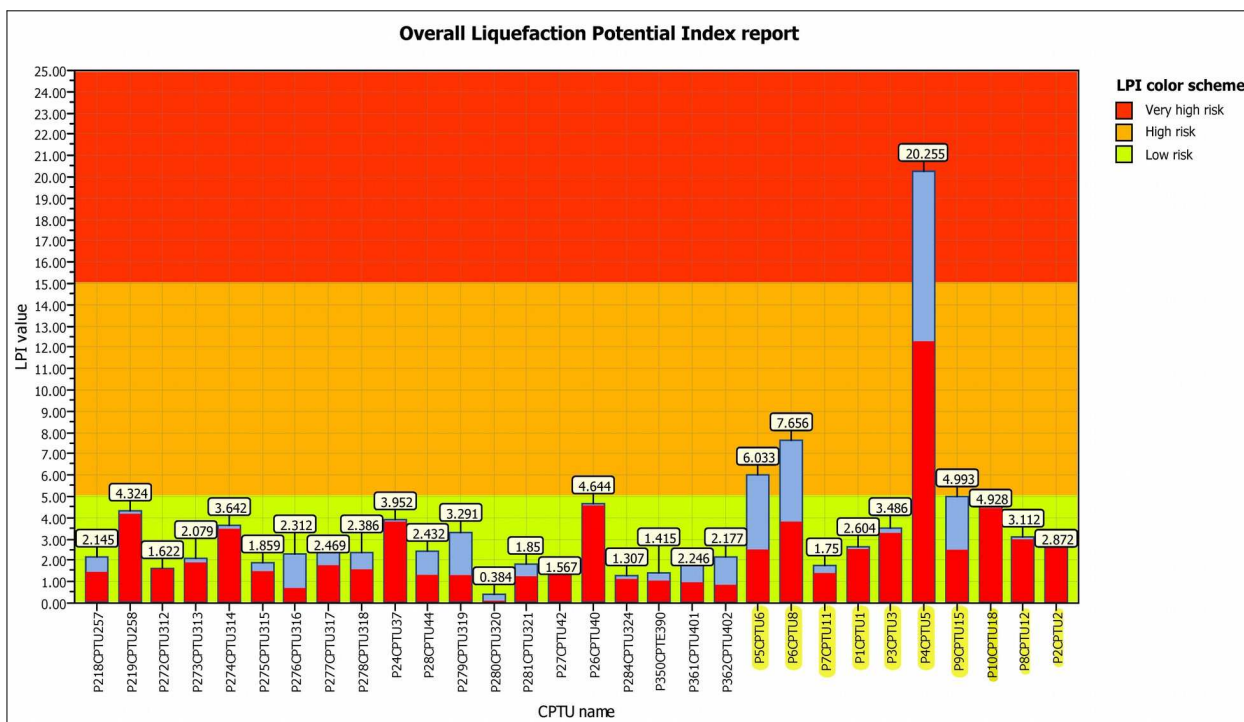
$$A = 10 - 9 \log (OCR)$$

When  $FS \leq 0.84$  set  $r_u = 1.0$  & limit  $\varepsilon_{vol} \leq 1\%$

Come già riportato, le simulazioni sono state eseguite sia per le prove CPTU di repertorio (con dati numerici disponibili), sia per le prove CPTU eseguite per questo studio, per un numero complessivo di 30 punti di controllo. Il confronto degli esiti di LPI ricavati dai tre differenti approcci considerati, evidenzia chiaramente come il metodo di Idriss e Boulanger 2008 risulti il più cautelativo (figura 7.12).



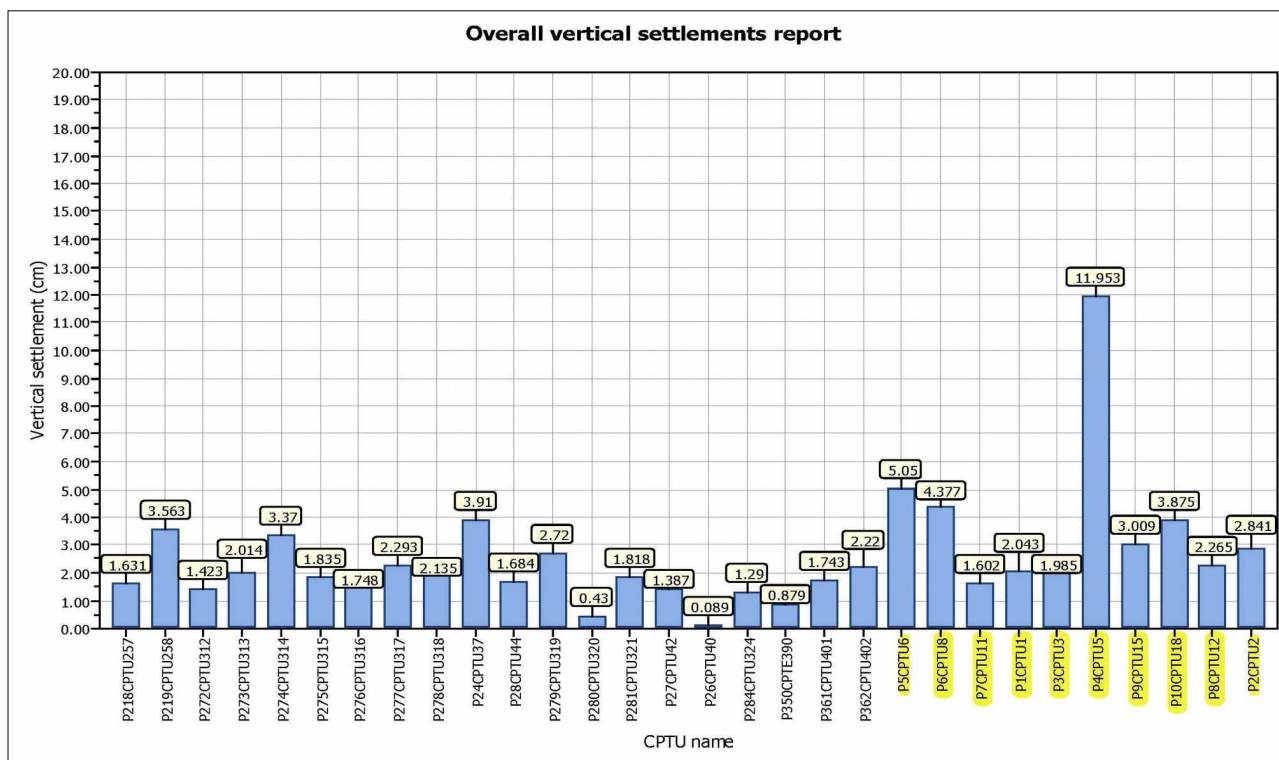
**Figura 7.12** – Confronto dei valori di LPI ricavati con le tre differenti procedure di calcolo dell'FS (dall'alto verso il basso: NCEER 2001; Idriss & Boylanger 2008; Robertson 2009). In evidenziato giallo, sono riportate le prove CPTU eseguite per questo studio.



**Figura 7.13** – Confronto dei valori di LPI stimati sulla base del calcolo di FS di Idriss & Boulanger 2008. In questo caso, l'istogramma consente di discriminare i contributi alla liquefazione forniti dall'intervallo di sedimenti fino a -10 metri di profondità (in rosso) e dal successivo intervallo da -10 a -20 metri (in azzurro). In evidenziato giallo, sono riportate le prove CPTU eseguite per questo studio.

La figura 7.13 consente, invece, di confrontare il contributo per i valori di LPI (metodo Idriss & Boulanger) dei primi 10 metri di sottosuolo: si evince come per ben 24 prove su 30 (80%) il principale contributo sia effettivamente dato da intervalli liquefacibili presenti nei primi 10 metri. Peraltro, le verifiche hanno riscontrato un solo caso di “rischio” complessivamente molto alto (LPI >15) e soltanto due prove classificabili a “rischio” alto (5 <LPI <15), mentre in tutti gli altri casi si riscontrano esiti di rischio classificabili da “basso” (LPI <2) a “moderato” (2 <LPI <5).

La figura 7.14 riporta la sintesi complessiva dei cedimenti totali calcolati nelle verticali delle prove penetrometriche CPTU, secondo l'approccio di calcolo di FSL di Idriss & Boulanger (2008). Si ricavano esiti di cedimento non particolarmente significativi, ad esclusione di poche prove, già descritte. Occorre rammentare che si tratta di un valore di cedimento cumulativo e riferito ad uno spessore di 20 metri di sedimenti e che un'effettiva analisi del cedimento e in particolare della sua ammissibilità è legata alle caratteristiche dei manufatti e all'effettiva interazione tra fondazione e sedimenti.



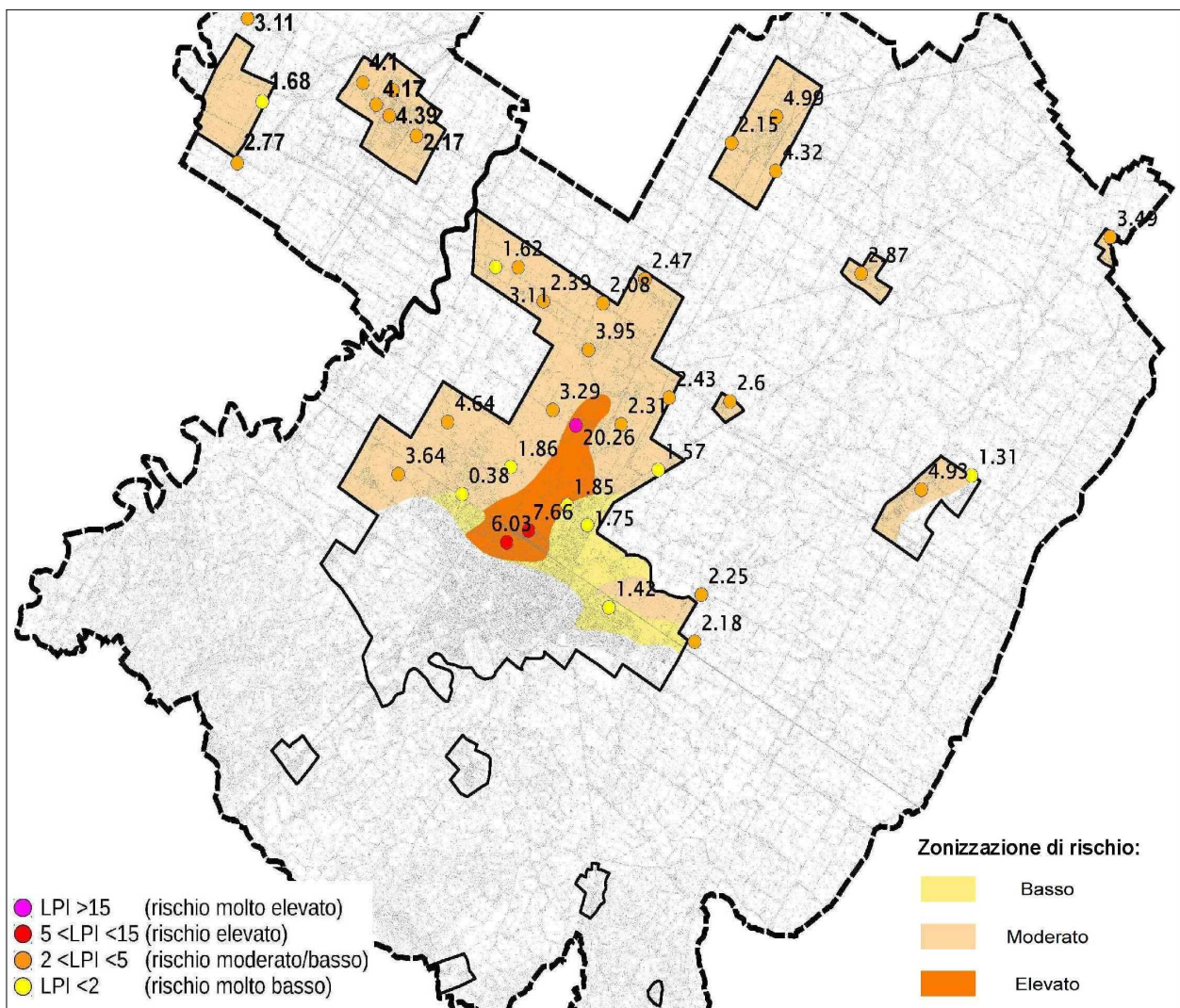
**Figura 7.14** – Confronto dei valori di cedimento post sisma cumulativi stimati sulla base del calcolo di FS di Idriss & Boulanger 2008. In evidenziato giallo, sono riportate le prove CPTU eseguite per questo studio.

Dalle simulazioni sopra descritte, emergerebbe un quadro di “rischio” di liquefazione che si potrebbe considerare nel complesso “moderato” alla scala dell'intero territorio studiato. Gli esiti hanno peraltro evidenziato che i valori di LPI più severi si concentrano in una particolare porzione del territorio di pianura di Faenza, alla quale viene cautelativamente attribuito un “rischio elevato” di liquefazione (figura 7.15). Tale zona è attribuibile, dal punto di vista geologico-deposizionale più recente, al contesto di facies di “interbacino fluviale”, peraltro la Carta Geomorfologica elaborata per il PSC dell'Unione (Marabini, 2009) già evidenziava la possibile presenza di un paleo alveo fluviale. Le quote topografiche risultano più depresse (conca morfologica) rispetto alle aree più prossime agli attuali alvei del Senio e Lamone.

La prova che fornisce esiti più severi (sigla P4CPTU5), evidenzia, ad esempio, sedimenti prevalentemente argillosi nei primi 10 metri con frequenti intercalazioni di limi e limi sabbiosi che appaiono contribuire in modo significativo all'incremento dell'indice di potenziale liquefazione.

Gli esiti più severi ricavati dalle prove CPTU giustificano, pertanto, la necessità di effettuare ulteriori approfondimenti in merito alla liquefacibilità e da espletarsi alla scala locale. In questo senso, può risultare proficuo alle analisi la caratterizzazione geotecnica diretta dei sedimenti con prove di laboratorio (tessiture; contenuto di fine; limiti di Atterberg; ecc.).

Gli approfondimenti sismici espletati per Faenza e Solarolo hanno effettivamente consentito ulteriori analisi di laboratorio per le valutazioni di liquefacibilità. Nel sondaggio a carotaggio continuo eseguito nel Capoluogo faentino (Piazzale Giani), sono stati prelevati campioni disturbati e indisturbati ed eseguite prove di classificazione geotecnica e prove prove dinamiche (“Colonna Risonante” e prove triassiali cicliche a liquefazione). Il sondaggio di Piazzale Giani è stato eseguito in corrispondenza della penetrometria CPTU (sigla “P6CPTU8”), prova che ha fornito il secondo esito più gravoso in termini di “rischio” di liquefazione con un valore di  $LPI = 7,7$  (figura 7.16).

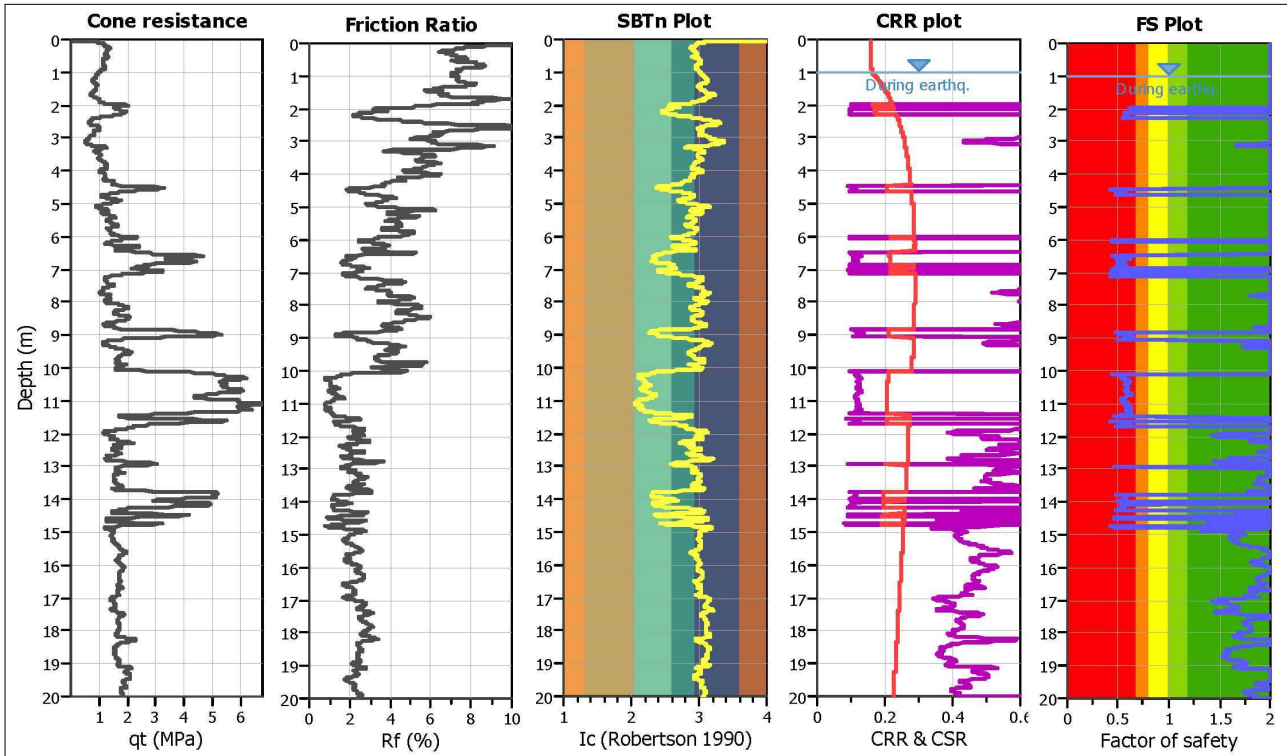


**Figura 7.15** – Sintesi delle verifiche dell'Indice di liquefazione potenziale ricavato da prove CPTU (FS calcolato con l'approccio di Idriss & Boulanger 2008) e zonizzazione di “rischio” di liquefazione elaborato per i Comuni di Faenza e Solarolo.

La figura 7.17 riporta una sintesi della colonna stratigrafica del sondaggio e prova “P6CPTU8”, con l'indicazione dei punti di prelievo e gli esiti delle prove di laboratorio. Gli esiti di laboratorio consentono di implementare nella verifica del fattore di sicurezza alla



liquefazione FS di Idriss & Boulanger il contenuto di fine FC per alcuni degli intervalli granulari rilevati dalla prova CPTU, liquefacibili e di maggior spessore. Il ricalcolo, porta ad una correzione limitata dei valori di FS e conseguentemente dei valori di LPI. In questo specifico caso, si riscontra una relativa attenuazione del “rischio” di liquefazione con un valore di LPI ridotto da 7,7 a 7,0 (figura 7.18).



**Figura 7.16** – Diagrammi di verifica del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione ricavati dalla prova CPTU (sigla “P6CPTU8”) con l’approccio di Idriss & Boulanger 2008).

Come premesso, sono state eseguite tre prove triassiali cicliche in condizioni non drenate per determinare la resistenza ultima in campo dinamico e analizzare il comportamento post-ciclico dei sedimenti analizzati. Nel nostro caso, le prove sono state spinte fino alla rottura per lo studio del meccanismo di liquefazione, applicando cicli (ad ampiezza costante) di incremento della pressione fino a raggiungere le condizioni di liquefazione nei provini analizzati. Il parametro di riferimento della prova CTX è il rapporto denominato “Stress Ratio” (SR) tra l’ampiezza della tensione deviatoria applicata (pari alla metà dell’escursione della pressione verticale ciclica) e la pressione isotropa di confinamento ( $SR = \Delta\sigma_a / 2\sigma'_o$ ). La pressione di confinamento che il laboratorio (ISMGEO) ha applicato è stata determinata sulla base delle caratteristiche dei campioni (profondità; contenuto d’acqua; DR ecc.).

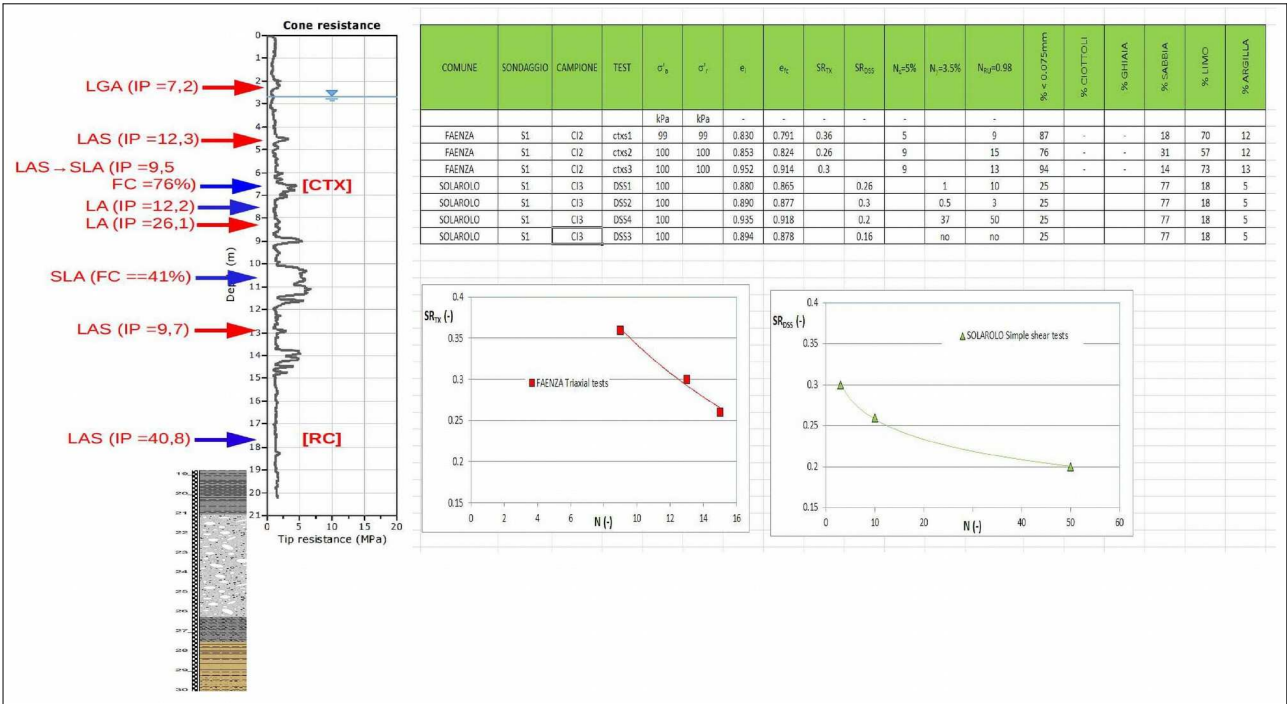


Figura 7.17 – Schema dei campionamenti effettuati nel sondaggio del Capoluogo (Piazzale Giani). La figura riporta la colonna stratigrafica (CPTU e sondaggio - per i sedimenti più profondi -) ed indica le quote di prelievo dei campioni. Il colore delle frecce indica la qualità del campione (in blu: indisturbato; in rosso: disturbato). Sono riportati alcuni parametri geotecnici ricercati e utili per l'analisi della liquefacibilità. A dx sono riportati gli esiti nella curva “Stress Ratio”/n. cicli a liquefazione della prove dinamiche di Faenza (triassiale ciclica) e Solarolo (taglio semplice ciclico).

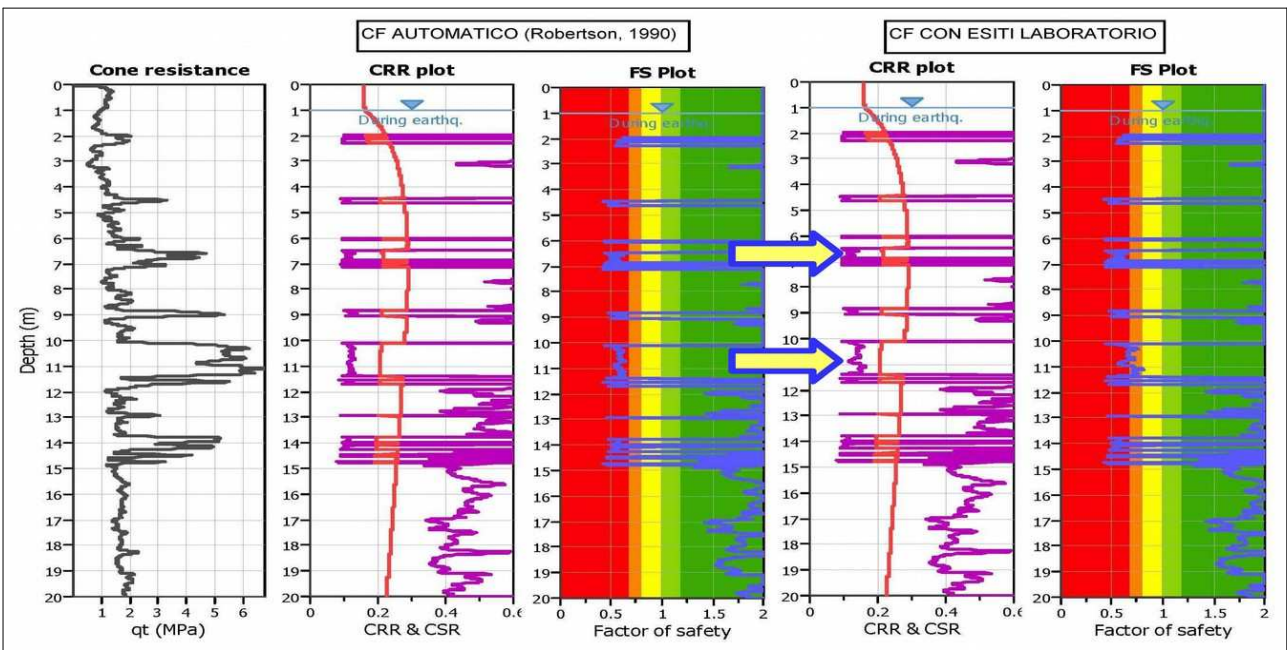


Figura 7.18 – Rielaborazione delle verifiche di FS (approccio Idriss & Boulanger 2008) della prova CPTU sigla “P6CPTU8”, con implementati gli esiti del contenuto fine FC ricavati dalle prove di laboratorio.

Il valore di SR così individuato in laboratorio rappresenta l'esito della tensione ciclica "in situ" necessaria per giungere a liquefazione ( $CSR=CRR$ ). La CTX si può ritenere una verifica "aperta", in quanto permette di verificare la liquefacibilità al variare dell'impulso sismico: il numero di cicli è infatti relazionato alla magnitudo del sisma da diverse relazioni empiriche. La DAL regionale n. 112/2007 riprende, ad esempio, la seguente relazione proposta da Seed et Al. (1975):

MAGNITUDO	Numero cicli equivalenti N	Accelerazione (g) di riferimento
5,25	2-3	0,15
6,00	5	0,25
6,50	8	0,30
7,00	12	0,35
7,50	15	0,45

È quindi possibile rivalutare la liquefacibilità caratteristica dell'intervallo di sedimenti analizzato attraverso il citato rapporto  $FS = CRR/CSR$  con:

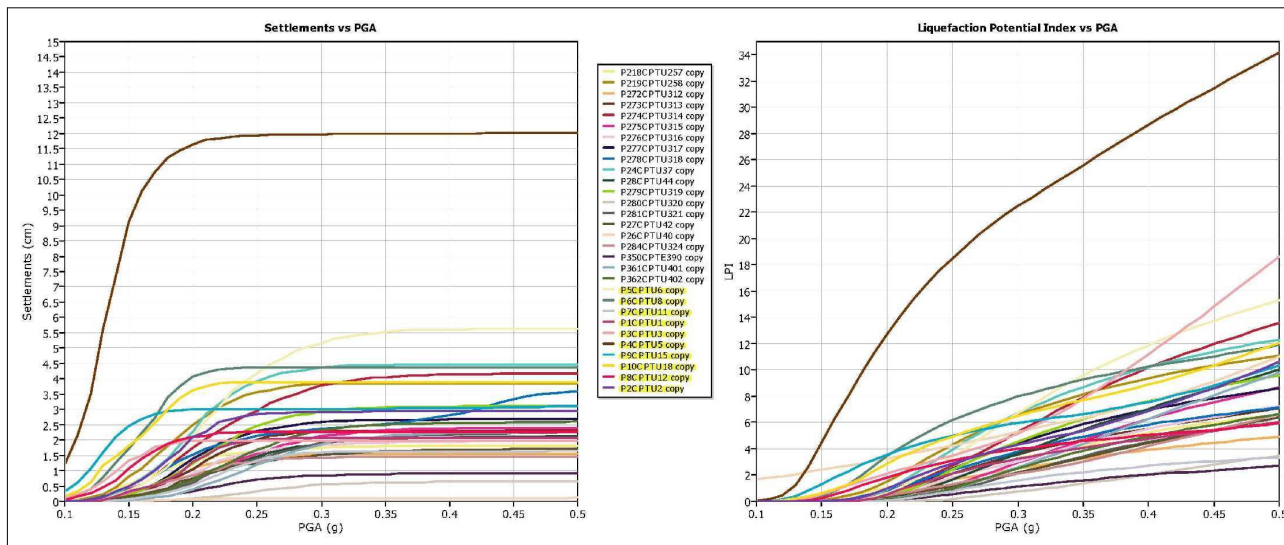
CRR → resistenza normalizzata CRR (Cyclic Resistance ratio) desunta dagli esiti delle prove triassiali cicliche a liquefazione

CSR → tensione tangenziale ciclica indotta dal terremoto di riferimento, stimata con l'equazione semiempirica proposta da Seed e Idriss (1971)

Sulla base dei dati ricavati dalla prova CTX, l'intervallo di sedimenti considerato non risulterebbe liquefacibile per magnitudo prossime a 6, in quanto l'esito di CRR ricavabile dalla curva di laboratorio (figura 7.15) è molto elevato e addirittura da estrapolare.

Ritenendo doveroso fornire valutazioni del rischio di liquefazione considerando anche input di Pga più severi rispetto agli esiti ricavati dallo studio, si è affrontata un'ulteriore simulazione "aperta" delle verifiche da prove CPTU. Si è voluto infatti stimare la variabilità dei cedimenti post-sisma e dell'indice LPI rispetto all'incremento delle Pga riscontrabili al suolo, mantenendo costanti gli altri parametri di input (magnitudo e falda). Questa simulazione si è anch'essa basata sull'approccio di stima del fattore di sicurezza alla liquefazione proposto da Idriss & Boulanger 2008

Gli esiti, riassunti graficamente nella figura 7.19, stimano cedimenti che risultano abbastanza contenuti come "media" delle prove, anche per valori di Pga elevati, ma con una rilevante variabilità tra prova e prova. Incrementando l'input di Pga, gli esiti di LPI possono rapidamente condurre a valutazioni di "rischio" elevato ( $LPI > 5$ ). Ciò porta, ancora una volta, a giustificare la necessità di eseguire ulteriori approfondimenti sulla liquefacibilità e sui cedimenti post-sisma alla scala locale. In fase di progettazione, gli approfondimenti dovranno ineludibilmente considerare le caratteristiche prestazionali dei manufatti di progetto e le relative condizioni di ammissibilità della liquefacibilità e dei cedimenti riscontrata da tali analisi.



**Figura 7.19** – Variabilità dei cedimenti post-sisma e di LPI in funzione della massima ag attesa al suolo (Pga) e con magnitudo di riferimento (M =6,14).

## **8 ELABORATI CARTOGRAFICI**

Le 32 tavole cartografiche (tabella 1), sono state realizzate secondo le specifiche indicate, per i livelli di approfondimento indicati nell'allegato D della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013) e risultano conformi alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

L'estensione e la forma degli ambiti oggetto di studio del Comune di Faenza ha imposto una suddivisione del territorio studiato in quattro tavole, per consentire di rappresentarlo, alla scala 1:10.000, entro la dimensione massima di una singola tavola (A0) prevista dalle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

Per tutte le 32 carte realizzate, la base cartografica è costituita dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000.

### **8.1 Carta delle Indagini (tavole 1)**

Lo studio di microzonazione sismica ha consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio e sugli esiti delle prove integrative realizzate per questo lavoro.

In questo senso, la "Carta delle Indagini", realizzata alla scala 1:10.000, permette la visione di insieme delle localizzazioni delle prospezioni geologiche e geofisiche realizzate nel territorio comunale di Faenza, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio (460 prove complessive per Faenza), comprendendo sia quelle di nuova realizzazione (87 prove), sia quelle di repertorio (373), come riportato nel capitolo 4.

Tutte le indagini sono distinte con le simbologie definite negli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

Per maggiori dettagli sulle indagini riportate in carta, relativi alla provenienza e alla tipologia dei dati, si rimanda al capitolo 4.

### **8.2 Carta Geologico Tecnica (tavole 2)**

La carta geologico-tecnica, realizzata alla scala 1:10.000 è un elaborato differente da una classica carta geologica o litologica, in quanto è finalizzata alla definizione del modello di sottosuolo utile per uno studio di microzonazione sismica. L'elaborazione di questa cartografia si è basata sui seguenti principali criteri:

- classi tessiturali definite secondo gli "standard di microzonazione sismica" (v.3.0);
- si è considerata la prevalenza tessitoriale nella "colonna" di sedimenti profonda fino a -6 metri (l'intervallo di sottosuolo che rappresenta il "volume significativo" per la maggior parte dei manufatti riscontrabili nell'area di studio);

Nei paragrafi seguenti vengono descritti i principali elementi rappresentati nella carta geologico-tecnica, generalmente identificati sulla base di quanto indicato nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, in particolare nelle aree collinari e montane.

### 8.2.1 *Forme di superficie e sepolte*

Le forme di superficie e sepolte, rivestono una certa importanza poiché mettono in evidenza alcune forme che possono influenzare il moto sismico in superficie e che quindi devono essere tenute nella giusta considerazione nelle valutazioni delle fasi successive. Negli ambiti di studio in Comune di Faenza sono presenti forme di:

- "Conoide alluvionale" e "Orlo di scarpata morfologica" (di altezza 10÷20 metri, in località Santa Lucia);
- "Orlo di terrazzo fluviale" (di altezza 10÷20 metri, lungo il fondovalle del Lamone nella zona Sud del Capoluogo);
- "Asse di paleoalveo" (attribuibili a "rotte" del Fiume Lamone, in località Reda e Pieve Cesato).

### 8.2.2 *Terreni di copertura*

Relativamente alle unità geologico-litotecniche previste dalle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013) per la carta geologico-tecnica, nel territorio del Comune di Faenza sono presenti "terreni di copertura" e "substrato geologico non rigido", molto alterato, affiorante nell'ambito della frazione Oriolo dei Fichi. Non si rinvenivano unità affioranti ascrivibili a "substrato geologico rigido". Secondo i criteri dettagliati al capitolo 5 per la definizione del modello geologico dell'area, sono state distinte, all'interno dei "terreni di copertura", un certo numero di differenti unità, prodotto della combinazione della litologia (sigla in maiuscolo e colore in carta) e dell'ambiente genetico-deposizionale (sigla in minuscolo) così come previsto dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013). Le suddivisioni litologiche con le relative descrizioni, indicate nella legenda delle carte, sono riportate nello schema seguente:

#### **FAENZA**

<b>GRS-SF</b>	Substrato geologico granulare cementato stratificato, molto alterato.
<b>RI</b>	Terreni contenenti resti di attività antropica (ri).
<b>SW</b>	Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: sabbie pulite e ben assortite, sabbie ghiaiose. Ambiente deposizionale di terrazzo fluviale (tf)

SM	Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: sabbie limose, miscela di sabbia e limo. Ambiente deposizionale di terrazzo fluviale (tf) o di argine/barre/canali (es).
SC	Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: sabbie argillose, miscela di sabbia e argilla. Ambiente deposizionale di argine/barre/canali (es).
ML	Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: limi inorganici, sabbie fini limose o argillose e limi argillosi di bassa plasticità. Ambiente deposizionale di terrazzo fluviale (tf) o di piana inondabile (pi).
CL	Tessiture prevalenti nei primi metri: Argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille limose e argille sabbiose. Ambiente deposizionale di terrazzo fluviale (tf) o piana inondabile (pi).

I colori utilizzati per i diversi terreni di copertura rappresentati sono quelli indicati dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

### 8.2.3 *Substrato geologico*

Entro gli ambiti di studio del Comune di Faenza è presente un substrato geologico affiorante soltanto nell'areale di Oriolo dei Fichi. In generale, per tutti i Comuni dell'Unione, tali perimetrazioni sono state realizzate sulla base di quanto indicato nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, partendo dalle aree in cui non sono indicate coperture, valutando la morfologia dei luoghi e verificando la presenza di affioramenti anche consultando le foto aeree. Per tutte le aree distinte come substrato è stata indicata, con appositi codici e retini, la presenza di stratificazione e di un certo grado di alterazione/fratturazione.

### 8.2.4 *Elementi geologici*

Sono riportati in carta i sondaggi, sia quelli che non hanno raggiunto il substrato, sia quelli che lo hanno raggiunto, e le tracce delle sezioni geologiche allegate allo studio di microzonazione.

Sondaggi: Sono riportati in carta tutti i sondaggi, a carotaggio continuo e a distruzione di nucleo e i pozzi per acqua considerati utili per lo studio. Quelli che hanno raggiunto il substrato sono rappresentati in verde, con l'indicazione della profondità del substrato, i restanti sono rappresentati in rosso, con l'indicazione della profondità raggiunta.

Tracce di sezione geologica: Vengono riportate le tracce delle 3 sezioni geologiche riportate nell'allegato 1 alla presente relazione. Due sezioni, sono tratte dall'archivio del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e caratterizzano il sottosuolo profondo con un dettaglio sufficiente per ciascuno dei contesti stratigrafici che attraversano. È riportata, inoltre, un'ulteriore sezione geologica riferita al Capoluogo, elaborata per questo studio sulla base dei dati di sottosuolo (sondaggi e penetrometrie) disponibili nel centro abitato. Quest'ultima sezione geologica offre un miglior dettaglio della stratigrafia meno profonda (fino a circa -30 metri) e schematizza ulteriormente il sottosuolo profondo.

### 8.2.5 *Instabilità di versante*

Partendo dalle indicazioni presenti nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, sono state individuate e verificate sulle fotografie aeree, le aree in cui sono presenti frane attive o quiescenti, distinte e codificate ciascuna sulla base della propria origine (scivolamento, scorrimento, crollo, ecc.).

Per quanto riguarda il Comune di Faenza, le zone di attenzione per instabilità di tipo franoso si concentrano in località Santa Lucia e questo senso occorre segnalare che la tavola classifica cautelativamente come "instabilità di versante non definita" anche una porzione di pendio che risulta allo stato di fatto stabile, ma con presenza di fattori di predisposizione al dissesto in condizioni sismiche (contesto litologico, acclività, faglie, parti di versante limitrofi già interessate da franamenti).

### 8.2.6 *Elementi tettonico strutturali*

È riportato un unico elemento tettonico riconducibile a faglia diretta o dal cinematismo non definito, già rilevata nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, che risulterebbe "non attiva". Tale elemento è situato nei pressi della frazione S.Lucia.

## 8.3 **Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (tavole 3)**

Nelle carte delle frequenze naturali dei terreni non è stato possibile realizzare una affidabile e significativa suddivisione del territorio dei comuni in aree per classi di frequenza, secondo quanto proposto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013):  $f_0 \leq 1$  hz,  $1 < f_0 \leq 2$  hz,  $2 < f_0 \leq 8$  hz,  $f_0 > 8$  hz. Sono però riportati i punti di misura di rumore ambientale, con l'indicazione del valore della frequenza di risonanza fondamentale ( $f_0$ ) registrata e di altre significative frequenze di amplificazione, distinguendo (in rosso) quelle con ampiezza massima della curva HVSR maggiore di 3. I dati acquisiti attraverso la campagna di misure di microtremore realizzata a supporto del presente studio, correlati coi dati geognostici disponibili, hanno in diversi casi consentito di individuare la profondità del principale contrasto di impedenza che è stato considerato anche nelle modellazioni numeriche di RSL effettuate in areali di pianura (capitolo 7) e di individuare quindi le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, per la definizione dei fattori di amplificazione (paragrafo 7.1). Si limitano infine a poche unità le verticali in cui si sono registrati valori del picco di frequenza fondamentale non in linea con le caratteristiche della zona MOPS di appartenenza, probabilmente in ragione di qualche anomalia locale.

Si sottolinea come tale cartografia, non prevista dagli indirizzi e dalle linee guida nazionali, sia invece molto utile per conoscere la frequenza di risonanza dei terreni all'interno degli ambiti di studio. Tale informazione può infatti risultare assai utile per la pianificazione territoriale: come noto da tempo e come recentemente verificato anche a seguito del



terremoto de L'Aquila del 2009 e dell'Emilia del 2012, in corrispondenza di picchi significativi di H/V i terreni possono essere soggetti a fenomeni di amplificazione sismica locale (Mucciarelli, 2012). In particolare, gli effetti di sito a carico delle strutture sono tanto più rilevanti quanto più la frequenza di risonanza del suolo è prossima a quella degli edifici. La possibile occorrenza di tale fenomeno, noto come "doppia risonanza", può quindi essere prevista, sulla base delle indicazioni della Carta delle frequenze naturali dei terreni, già in fase di pianificazione territoriale.

#### **8.4 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavole 4)**

La carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013), presenta la suddivisione del territorio dei comuni in "Zone suscettibili di amplificazioni locali" e "Zone di attenzione per instabilità", oltre a riportare le stesse "forme di superficie e sepolte" già presenti nella carta geologico tecnica (tavole 2, paragrafo 8.2.1), i punti di misura di rumore ambientale e le tracce delle sezioni topografiche realizzate per determinare i fattori di amplificazione "ft". (queste ultime non elaborate per gli ambiti di studio dei comuni di Castel Bolognese, Faenza e Solarolo). Tale carta rappresenta l'elaborato fondamentale della microzonazione sismica di livello 1.

Per quanto riguarda la distinzione delle diverse zone MOPS, si rammenta che, per consentire la stesura di cartografie coerenti tra i Comuni dell'Unione, si è deciso di procedere all'elaborazione di tali zone in maniera congiunta tra i Professionisti incaricati rispettivamente degli studi di "livello 2" (Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme) e degli approfondimenti di "livello 3" (Faenza e Solarolo). In questo senso, si sono attribuiti alla medesima zona MOPS ambiti territoriali ricadenti anche in Comuni diversi. È da segnalare, come esempio, l'areale di studio presso la località Marzeno, risultato "diviso" dal limite amministrativo tra il Comune di Faenza e quello di Brisighella. La classificazione delle zone MOPS ha seguito, pertanto, una numerazione progressiva unica per tutti i Comuni dell'Unione. Sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica, si sono distinte 28 classi complessive di cui 12 attribuite nei Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme. Nei Comuni di Faenza e Solarolo le classi attribuite agli ambiti di studio sono complessivamente 19 (3 classi condivise con gli altri Comuni dell'Unione e 16 nuove classi).

A parte il "Substrato geologico molto fratturato o alterato" (codice 2099), coincidente con le aree indicate nella carta geologico-tecnica come "Substrato geologico" (paragrafo 8.2.3) e per cui non è prevista una descrizione di dettaglio in legenda, le 19 classi attribuite agli ambiti di studio di Faenza con le relative descrizioni, sono riportate nello schema che segue. Come si può notare, per ciascuna classe è riportato lo spessore delle coperture che verrà poi considerato nel successivo calcolo dei fattori di amplificazione, comprensivo

di un'eventuale porzione di bedrock alterato.

2004	Zona 2004 - Piana di fondovalle subattuale (AES8a) sovrastante substrato marino "non rigido" (Argille Azzurre). Spessore coperture: H=15 m (alluvioni + bedrock alterato).
2007	Zona 2007 - Piana terrazzata intravalliva con successioni di alluvioni fini più o meno consistenti e parzialmente ghiaiose (AES7, AES8) sovrastante substrato marino "non rigido" (Argille Azzurre). Spessore coperture: H=20 m (alluvioni + bedrock alterato).
2012	Zona 2012 - Substrato marino "non rigido" e "detensionato" (Argille Azzurre, Sabbie Gialle). Spessore coperture: H=20 m (bedrock alterato).
2013	Zona 2013 - Piana intravalliva e di fondovalle con successioni irregolari di alluvioni parzialmente ghiaiose (AES7, AES8, AES8a), sovrastanti substrato marino "non rigido" e "detensionato" (Argille Azzurre, Sabbie Gialle). Spessore coperture: H=15 m (alluvioni + bedrock alterato).
2014	Zona 2014 - Piana terrazzata con successioni di alluvioni fini consistenti e variamente ghiaiose (AES5, AES6). Substrato sismico alluvionale e/o marino "non rigido" (Argille Azzurre, Sabbie Gialle) a profondità < 120 m (Pianura 1)
2015	Zona 2015 - Piana terrazzata intravalliva con successioni di alluvioni fini scarsamente consistenti e parzialmente ghiaiose (AES7, AES8), sovrastanti substrato marino "non rigido" e "detensionato" (Argille Azzurre). Spessore coperture: H=20 m (alluvioni + bedrock alterato).
2016	Zona 2016 - Conoide terrazzata e piana di fondovalle con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti e parzialmente ghiaiose (AES8, AES8a), sovrastanti ghiaie e substrato alluvionale "non rigido" (AES7, AEI). Spessore coperture: H=15 m (alluvioni).
2017	Zona 2017 - Conoide terrazzata e piana di fondovalle con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti, con livelli sabbiosi e/o ghiaiosi insaturi (AES8, AES8a), sovrastanti ghiaie e substrato alluvionale "non rigido" (AES7, AEI). Spessore coperture: H=20 m (alluvioni).
2018	Zona 2018 - Conoide terrazzata e piana di fondovalle con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti, con livelli sabbiosi e/o ghiaiosi saturi (AES8, AES8a), sovrastanti ghiaie e substrato alluvionale "non rigido" (AES7, AEI). Spessore coperture: H=20 m (alluvioni).
2019	Zona 2019 - Conoide terrazzata e piana di fondovalle con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti, con livelli sabbiosi e/o ghiaiosi saturi (AES8, AES8a), sovrastanti ghiaie a profondità variabili tra 15-20 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità $\geq$ 120 m (Pianura 2). (ZALQ 1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1).
2020	Zona 2020 - Conoide terrazzata con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti e parzialmente ghiaiose (AES8), sovrastanti ghiaie sabbiose a profondità variabili tra 10-20 m. Substrato sismico alluvionale e/o marino "non rigido" (Argille Azzurre, Sabbie Gialle) a profondità < 120 m (Pianura 1).
2021	Zona 2021 - Conoide terrazzata con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti, con livelli sabbiosi insaturi (AES8), sovrastanti ghiaie e/o ghiaie sabbiose a profondità variabili tra 10-20 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità $\geq$ 120 m (Pianura 2).
2022	Zona 2022 - Conoide terrazzata con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti, con livelli sabbiosi saturi (AES8), sovrastanti ghiaie e/o ghiaie sabbiose a profondità variabili tra 10-20 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità $\geq$ 120 m (Pianura 2). (ZALQ 1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1).
2023	Zona 2023 - Conoide terrazzata con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti, con livelli sabbiosi saturi (AES8), sovrastanti ghiaie e/o sabbie a profondità variabile tra 15-25 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità $\geq$ 120 m (Pianura 2). (ZALQ 1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1).

2024	Zona 2024 - Media e bassa pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini (AES8, AES8a), con locali intervalli di sabbie e/o sabbie ghiaiose insature nei primi 25 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità $\geq 120$ m (Pianura 2).
025	Zona 2025 - Media e bassa pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini (AES8, AES8a), con locali intervalli di sabbie e/o sabbie ghiaiose sature nei primi 25 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità $\geq 120$ m (Pianura 2). (ZALQ 1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1).
2026	Zona 2026 - Bassa pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini (AES8, AES8a) con locali intervalli di sabbie sature nei primi 30 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità $\geq 120$ m (Pianura 2). (ZALQ 1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1).
2027	Zona 2027 - Bassa pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini (AES8, AES8a). Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità $\geq 120$ m (Pianura 2).
2028	Zona 2028 - Paleodosso fluviale con successione spessa maggiore di 30 m di alluvioni fini più o meno consistenti e intervalli sabbiosi saturi (AES8, AES8a). Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità $\geq 120$ m (Pianura 2). (ZALQ 1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1).

Rispetto alle diverse litologie (superficiali) distinte nella carta geologico-tecnica, estendendo la valutazione a profondità maggiore, si è cercato di arrivare a delle semplificazioni, accorpendo alcune stratigrafie analoghe e cercando di utilizzare un criterio di similarità dal punto di vista della possibile risposta sismica e delle eventuali criticità locali.

Le prime 15 zone MOPS (da 2001 a 2015), a meno di piccole variazioni, ricalcano nelle descrizioni litologiche e negli spessori indicati, le suddivisioni dello studio di microzonazione del 2009 (Marabini, 2009). Ad inizio del lavoro di adeguamento agli standard, sono state infatti distinte a livello dell'intera Unione tutte le stratigrafie-tipo dello studio del 2009 e a ciascuna è stato attribuito un proprio codice MOPS secondo quanto previsto dagli attuali standard DPC.

Anche per le successive MOPS (da 2016 a 2028), attribuite prevalentemente agli ambiti di studio di Faenza e Solarolo (ad esclusione della zona 2025), si è ricalcata la classificazione del precedente studio di microzonazione, con ulteriori variazioni (nei limiti e nelle definizioni litologiche) giustificate dagli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche d'approfondimento effettuate per questi due Comuni.

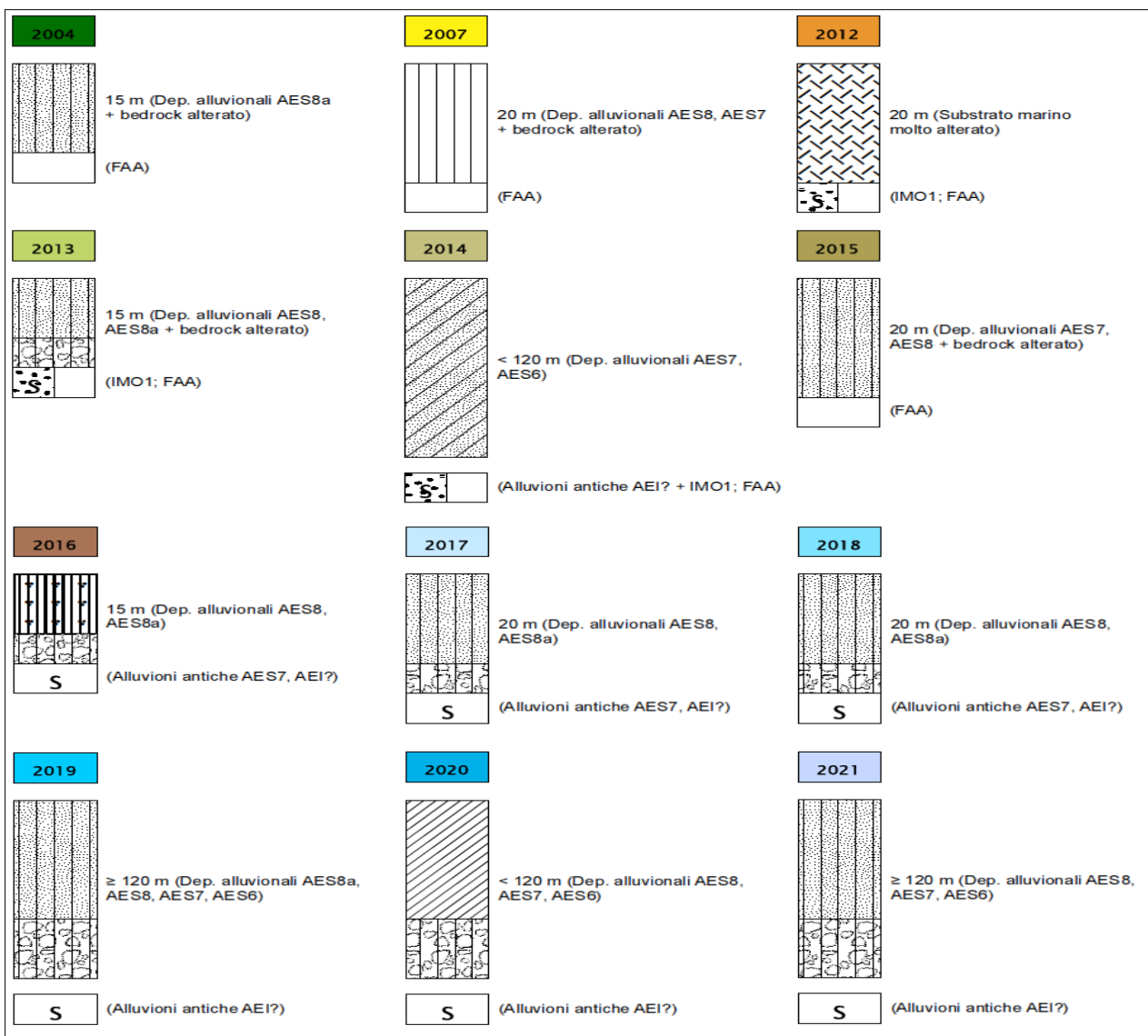
In conseguenza del lavoro congiunto di revisione delle stratigrafie-tipo dello studio del 2009, si rammenta che i codici attribuiti alle MOPS possono non essere progressivi sul singolo Comune. Ad esempio, a livello del presente lavoro sui 6 comuni in oggetto, la zona 2025 non è in ordine numerico perché originariamente presente solo nei comuni di Faenza e Solarolo. Ad esempio, a livello del presente lavoro le zone 2004 e 2007 non risultano in preciso ordine numerico perché condivise con la classificazione degli ambiti terrazzati di fondovalle di Brisighella.

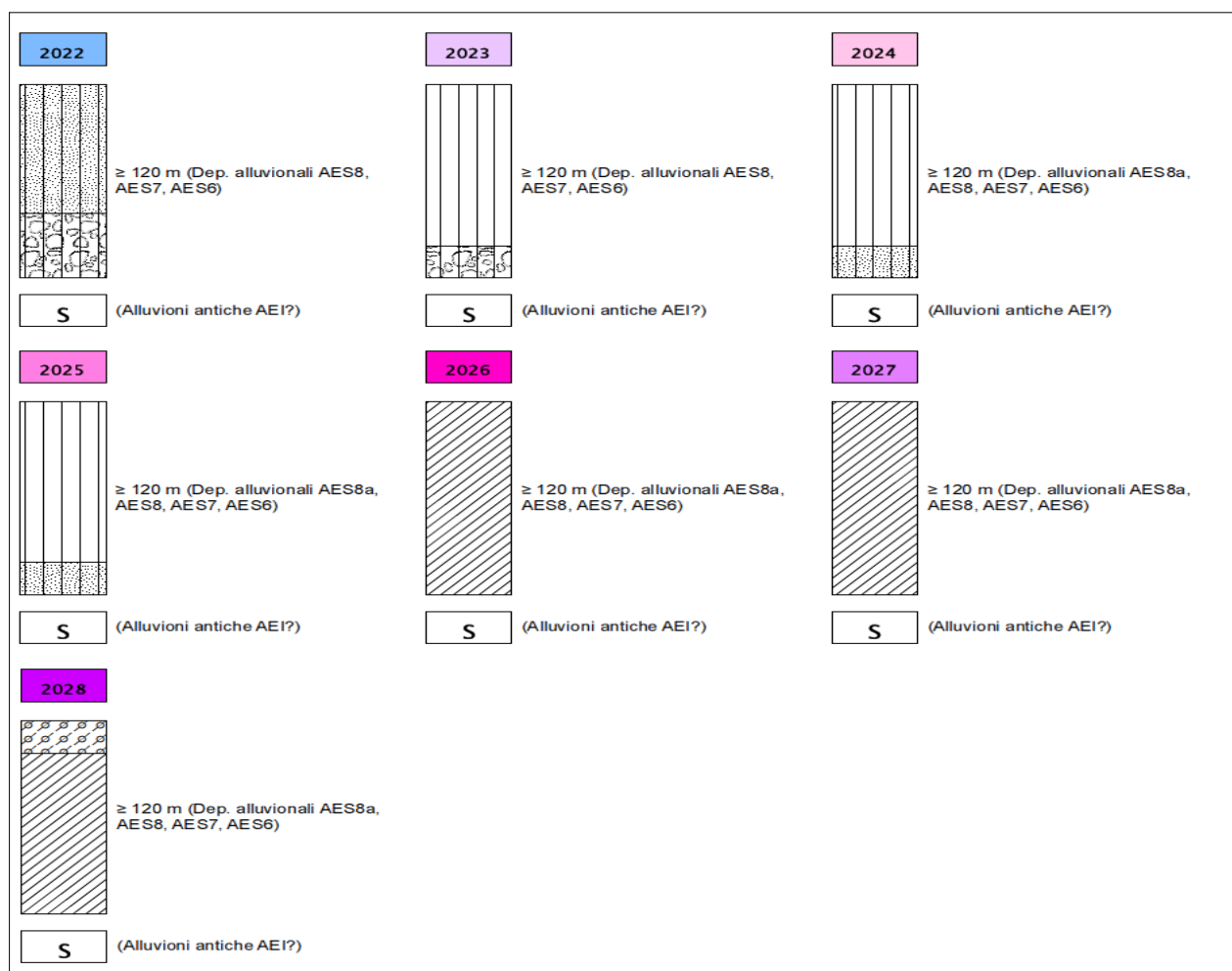
A seguito degli approfondimenti eseguiti, l'intero territorio indagato risulta comunque

soggetto ad amplificazioni locali, di entità variabile in funzione delle diverse zone MOPS individuate. Nelle cartografie di riferimento (tavole 4) sono pertanto state distinte:

- le “Zone suscettibili di amplificazioni locali” rappresentate dalle zone MOPS che non sono anche classificate come “di attenzione per liquefazioni”,
- le “Zone di attenzione per instabilità”, che all'interno del territorio indagato sono di tre tipi: le “Zone di attenzione per liquefazioni tipo 1” (codice 3050), identificate sulla base dei criteri descritti al paragrafo 7.2, le “Zone di attenzione per instabilità di versante” (Comune di Faenza), le “Sovrapposizioni di zone di attenzione per instabilità differenti” (Comune di Solarolo), e le “Zone di attenzione per cedimenti differenziali” (Comune di Faenza).

Per le 19 classi individuate nel Comune di Faenza vengono di seguito riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi, così come richiesto gli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013):





### 8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavole 5)

Nella carta della velocità delle onde di taglio realizzata alla scala 1:10.000 secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013), sono riportati i punti di misura di  $V_s$  di archivio e nuova realizzazione utilizzati per associare alle singole zone MOPS il corretto fattore di amplificazione utilizzando gli abachi. Su ciascun punto è indicato il valore di  $V_{s30}$  o  $V_{sH}$ , cioè fino al bedrock o pseudo-bedrock sismico (paragrafo 6.3). Si sottolinea che non tutti i valori di velocità sono stati riportati nella carta, ma sono stati esclusi tutti quelli delle indagini che hanno restituito modelli sismo-stratigrafici non coerenti con i dati disponibili o che presentano una evidente sovrastima dei valori di  $V_s$ . In diversi casi si è preferito infatti utilizzare delle modellazioni fatte sulla base dei risultati delle misure di microtremore ove possibile correlate con dati stratigrafici, che per quanto affette da incertezze, possono comunque fornire utili indicazioni (Castellaro et al., 2005).

Nella carta della velocità delle onde di taglio realizzata alla scala 1:10.000 secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013),

sono riportati i punti di misura di  $V_s$  di archivio e nuova realizzazione. Per quanto riguarda il Comune di Faenza, gli esiti di  $V_s$  sono risultati di riferimento per la modellazione della Risposta Sismica Locale nelle MOPS interessate dagli approfondimenti di "livello 3" (zone da 2017 a 2024). Negli altri areali di studio i dati di  $V_s$ , opportunamente correlati con altri dati geognostici e geofisici, sono stati associati alle singole zone MOPS per definire il corretto fattore di amplificazione utilizzando gli abachi dell'Allegato A2 degli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007).

Su ciascun punto è indicato il valore di  $V_{s30}$  o  $V_{sH}$ , cioè fino al bedrock o pseudo-bedrock sismico (paragrafo 6.3). Si sottolinea che non tutti i valori di velocità sono stati riportati nella carta, ma sono stati esclusi tutti quelli delle indagini che hanno restituito modelli sismo-stratigrafici non coerenti con i dati disponibili o che presentano una evidente sovrastima dei valori di  $V_s$ , come descritto al capitolo 6.4. Per Faenza, si è potuto disporre di ulteriori esiti di  $V_s$  ricavate in modo diretto da prove penetrometriche con "Cono Sismico" (via Celle; Granarolo; Reda) e prove sismiche in foro tipo "Down-Hole" (eseguite nel Capoluogo). Per questo studio, sono stati eseguiti due stendimenti sismici in "array" bidimensionale tipo ESAC (eseguite rispettivamente nel Capoluogo e a Granarolo). In alcuni areali, caratterizzati da buone informazioni di sottosuolo, si sono utilizzate delle modellazioni fatte sulla base dei risultati delle misure di microtremore che, per quanto affette da incertezze, possono comunque fornire utili indicazioni (Castellaro et al., 2005).

### **8.6 Carta di microzonazione sismica di livello 3 (tavole 6, 7 e 8)**

Le 12 carte di microzonazione sismica di livello 3, realizzate secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013) e dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), identificano le "Zone stabili", le "Zone suscettibili di instabilità" e le "Zone suscettibili di amplificazioni locali" e rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente studio di microzonazione sismica.

Tali carte aggiungono, alle "Zone suscettibili di amplificazioni locali" già individuate nella carta MOPS, attraverso la suddivisione del territorio analizzato sulla base di classi predefinite contraddistinte da colori differenti, la quantificazione dei tre fattori di amplificazione previsti dagli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007):

- $F_{PGA}$  (tavola 6): fattori di amplificazione espressi come rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico ( $PGA/PGA_0$ );
- $F_{0,1-0,5s}$  (tavola 7): fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico ( $SI/SI_0$ ) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;

- $F_{0,5-1s}$  (tavola 8): fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico ( $S_i/S_{i0}$ ) per periodi compresi tra 0,5 e 1 secondi.

L'Intensità di Housner corrisponde all'area sottesa dallo spettro di risposta di pseudovelocità e rappresenta un indicatore della pericolosità sismica poiché correlabile all'energia che viene dissipata nelle strutture durante un terremoto.

Le analisi di approfondimento di livello 3 hanno consentito l'elaborazione di modelli numerici random di RSL. Gli esiti di amplificazione numerica sono stati assunti come riferimento per le rispettive zone MOPS.

## 9 BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2005) - *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. Deliverable D23.12 of the SESAME project, 62 pp, April 2005. Available at <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV. (2011) - *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"*. Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII - n.2.
- Albarello D. e Castellaro S. (2011) - *Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola*. In AA.VV. (2011) - *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"*. Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII - n.2.
- Amorosi A., Caporale L., Cibin U., Colalongo M.L., Pasini G., Ricci Lucchi F., Severi P & Vaiani S.C. (1998a) – *The Pleistocene littoral deposits (Imola Sands) of the Northern Apennines foothills*. *Il Giornale di Geologia*, 60, 83-118.
- Amorosi A., Barbieri M., Castorina F., Colalongo M.L., Pasini G. & Vaiani S.C. (1998b) – *Sedimentology, micropaleontology and strontium-isotope dating of a lower-middle Pleistocene marine succession ("Argille Azzurre") in the Romagna Apennines, northern Italy*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 117, 789-806.
- Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M.M. e Boschi E. (2008) - *The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology*. *Tectonophysics*.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P. e Vannucci G. (2004) - *Carta sismotettonica della regione Emilia-Romagna; Note illustrative*. A cura di : Boccaletti M. e Martelli L., Servizio geologico sismico e dei suoli.
- Boccaletti M., Coli M., Eva C., Ferrari G., Giglia G., Lazzarotto A., Merlanti F., Nicolich R., Papani G. & Postpischl D. (1985) - *Considerations on the seismotectonics on the Northern Apennines*. *Tectonophysics*, 117, 7-38.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2004) - *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proc., 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., ed Stallion Press, Vol. 1, 32-56.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2007) – *Evaluation of cyclic softening in silts and clays*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 133(6): 641-52.
- Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005) - *Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique*. *Geologia e tecnica ambientale*, 3.
- Castellaro S. e Mulargia F. (2011) - *Seismic soil classification from a different perspective*. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13-15.



Castellaro S. (2012) - *H/V: un contributo oltre Vs30*. In "Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici" a cura di Mucciarelli M..

Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C. e Amato A. (2006) - *CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002 versione 1.1*. INGV-CNT, Roma, [Online], Available: <http://csi.rm.ingv.it/>.

Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P. & Ottria G. (2002) - *Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000*. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, sismico e dei Suoli – CNR, Istituto di Georisorse e Geoscienze, Pisa. S.EL.CA., Firenze.

Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2013) - *Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 3.0*. Disponibile all'indirizzo web: [http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS\\_3.0\\_open.pdf](http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS_3.0_open.pdf).

Crespellani, Nardi, Simoncini (1991) – *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*. Zanichelli, Bologna.

DISS Working Group (2015) - *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, ©INGV2015 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0.

Elmi, Zecchi (1982) – *Note sulla sismicità dell'appennino emiliano-romagnolo*. In Guida alla geologia del margine appenninico-padano. Società Geologica Italiana – Guide Geologiche regionali, Bologna.

Facciorusso, J., Madiari C., Vannucchi G., Martelli, L. (2012). *Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione: il caso della costa adriatica romagnola*. In: "La microzonazione sismica per la gestione del territorio. L'esperienza della regione Emilia-Romagna". Regione Emilia-Romagna Eds.

Facciorusso, J., Madiari C., Vannucchi G., (2013). *Confronto tra metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione da prove CPT e CPTU*. Università degli Studi di Firenze – Facoltà di Ingegneria – Sezione geotecnica.

Galli P., Castenetto S., Peronace E. (2012) – *Terremoti dell'Emilia – maggio 2012 – Rilievo Macrosismico MCS speditivo – Rapporto finale*. Dipartimento della Protezione Civile – Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico.

Galli, Meloni, Rossi (1999) - *Historical liquefaction in Italy: relationship between epicentral distance and seismic parameters*. European Geophysical Society XXVIII General Assembly Natural Hazards NH3, The Hague, Netherlands.

Gruppo di lavoro MS (2008) – *ICMS, Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd. Disponibili nel sito web del Dipartimento della Protezione Civile, area "Rischio Sismico" all'indirizzo: [http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir\\_pk=395&cms\\_pk=15833](http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833).

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G. e Valensise G., INGV-SGA (2007) - *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and Mediterranean Area (760 B.C.-*

1500). <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.

Gruppo di lavoro MPS04 (2004) - *I dati online della pericolosità sismica in Italia*. <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>.

ISIDe Working Group (2010) - *Italian Seismological Instrumental and parametric database*. [Online], Available: <http://iside.rm.ingv.it>.

ISPRA, Regione Emilia-Romagna, Università di Bologna (2009a) - *Progetto CARG, Carta geologica Foglio 238 e "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia" – Foglio 238*.

ISPRA, Regione Emilia-Romagna, Università di Bologna (2009b) - *Progetto CARG, Carta geologica Foglio 239 e "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia" – Foglio 239*.

Krijnsman W., Hilgen F.J., Marabini S. e Vai G.B. (1999) – *New paleomagnetic and cyclostratigraphic age constraints on the Messinian of the Northern Apennines (Vena del Gesso Basin, Italy)*. Mem.Soc. Geol. Ital., 54, 25-33.

Lanzo G. & Silvestri F. (1999) – *Risposta Sismica Locale*. Edizioni Hevelius.

Locati M., Camassi R. e Stucchi M. (a cura di) (2011) - *DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano*. Milano, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11> DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11

Marabini S. e Poggiali A. (2009) - *Microzonazione sismica degli ambiti urbani. Quadro Conoscitivo, allegato 1 del Piano Strutturale Comunale Associato di Faenza, Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese, Riolo Terme e Solarolo*. Coordinamento scientifico: Direzione Generale Ambiente e difesa del Suolo e della Costa - Regione Emilia-Romagna.

Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi C., Madaia C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Brammerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V. Con il contributo di Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C. e Ricci L. (2013) - *Microzonazione sismica dell'area epicentrale del terremoto della pianura Emiliana del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti del 32° Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Fisica della Terra Solida, Trieste, ISBN: 978-88-902101-7-4.

Meletti C. e Valensise G. (a cura di) (2004) - *Zonazione sismogenetica ZS9 - App.2 al Rapporto conclusivo*. Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 3274/2003), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>.

Ministero delle Infrastrutture (2008) – D.M. 14/01/2008 (G.U. n.29 del 04/02/2008) – *Norme Tecniche per le Costruzioni*, Roma.

Mucciarelli M. (a cura di) (2012) - *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*.

Pieri M. e Groppi G. (1981) - *Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy)*. Progetto Finalizzato Geodinamica, publ.n° 414, C.N.R., 23.

Regione Emilia Romagna - *Legge Regionale n.20/2000 - "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio"*.

Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, ENI - AGIP (1998) - *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000, Bologna*.

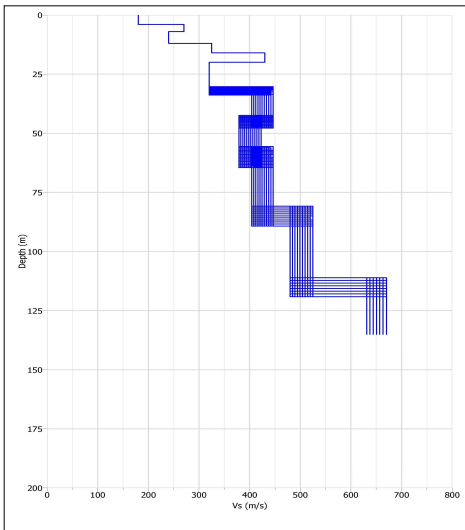
Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, CNR - *Centro di Studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino (2002) - Carta Geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo - scala 1:250.000*. Ed. SELCA, Firenze.

Regione Emilia-Romagna - *Delibera Assemblea Legislativa n. 112/2007 - Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della LR 20/2000 Disciplina generale sulla tutela del territorio, in merito a "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica"*.

**ALLEGATI**

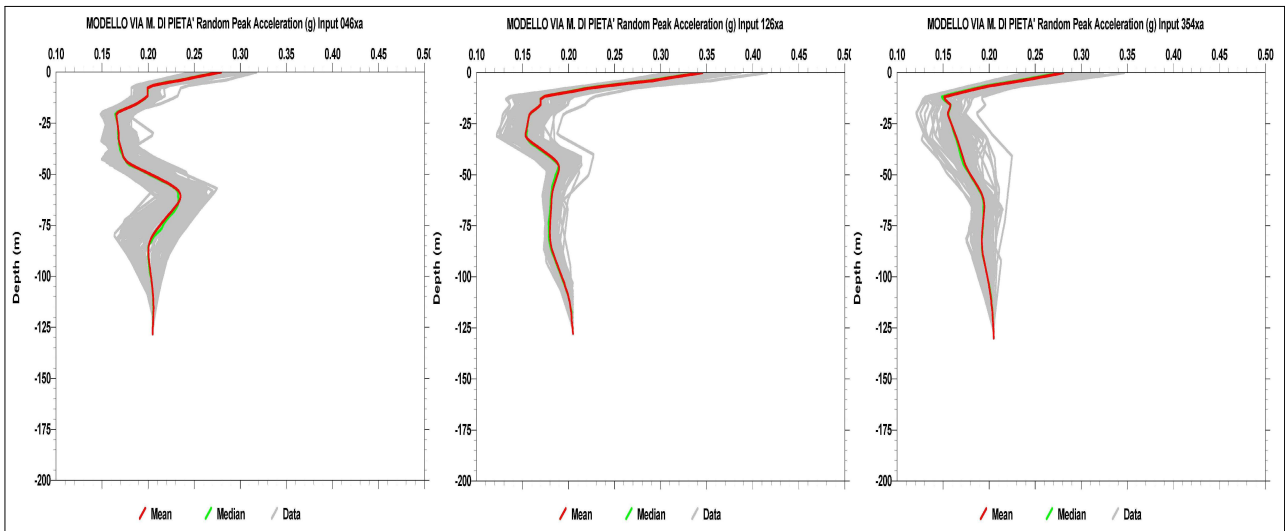
# MODELLO SHAKE: DOWN-HOLE VIA MONTE DI PIETA'

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:

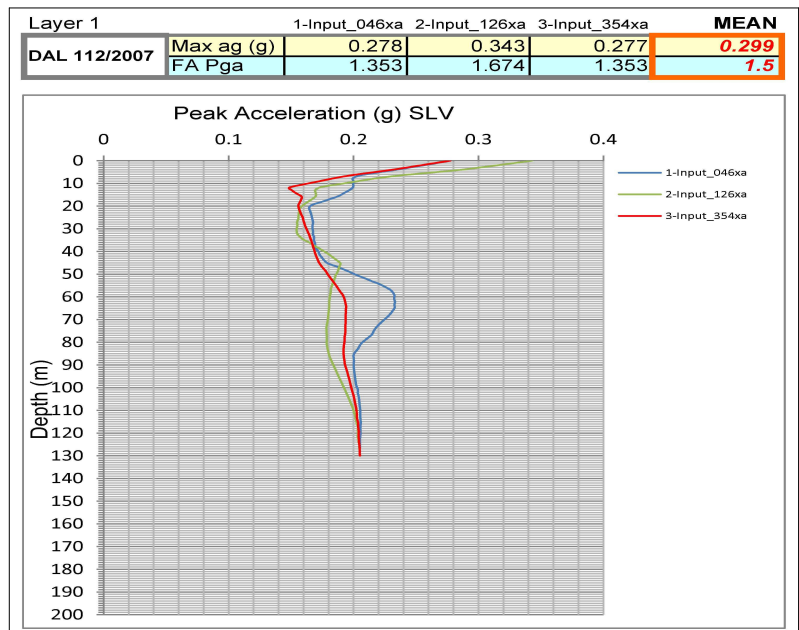


Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve	
1	5	4,0		4,0	17,0	0,05	180		Soil PI=15	
2	4	3,0		7,0	18,0	0,05	270		Soil PI=0	
3	5	5,0		12,0	18,0	0,05	240		Soil PI=15	
4	3	4,0		16,0	19,0	0,05	325		Sand Upper	
5	7	4,0		20,0	20,0	0,05	430		Gravel	
6	5	12,0	±2		19,0	0,05	320		Soil PI=15	
7	7	13,0	±3		20,0	0,05	425	±25	Gravel	
8	4	15,0	±5		19,0	0,05	400	±25	Soil PI=0	
9	5	25,0	±5		20,0	0,05	425	±25	Soil PI=15	
10	5	30,0	±5		21,0	0,05	500	±25	Soil PI=15	
11	Profondità vincolata pseudobedrock: -100÷130 m							650	±25	

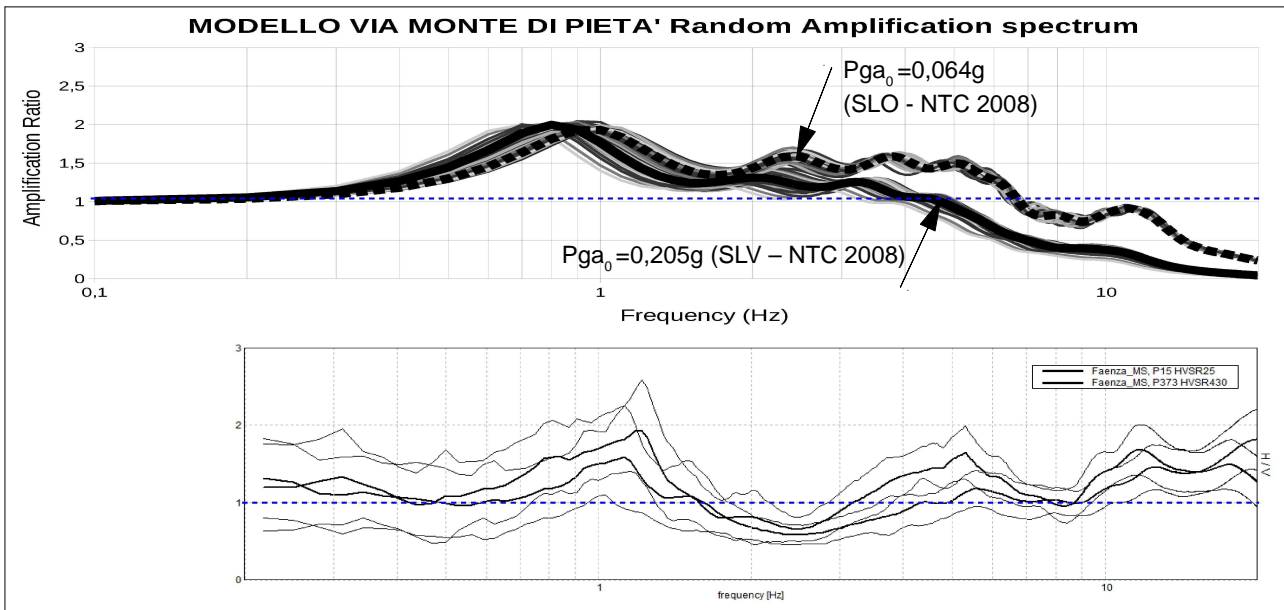
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO:



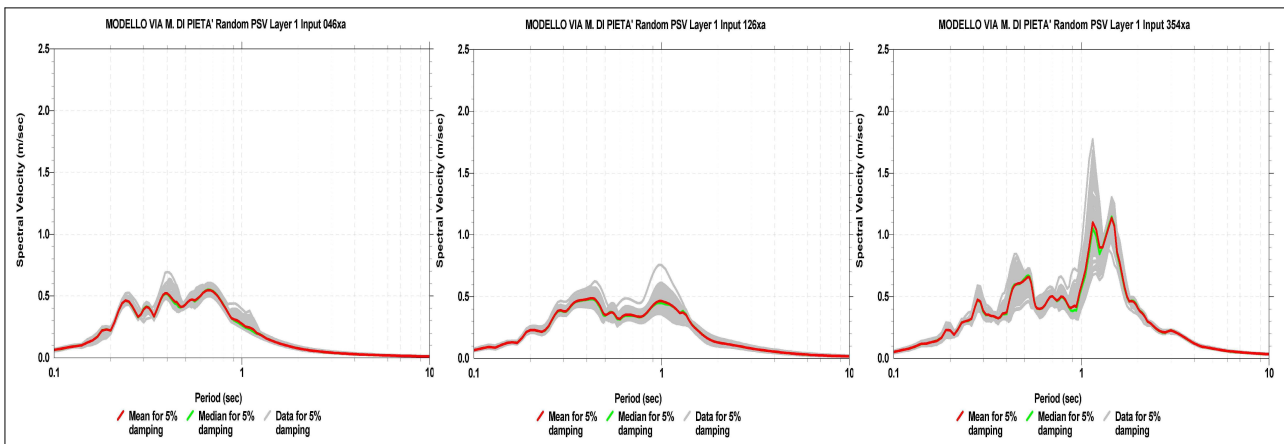
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (VALORI DI MEDIANA) VALORI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:



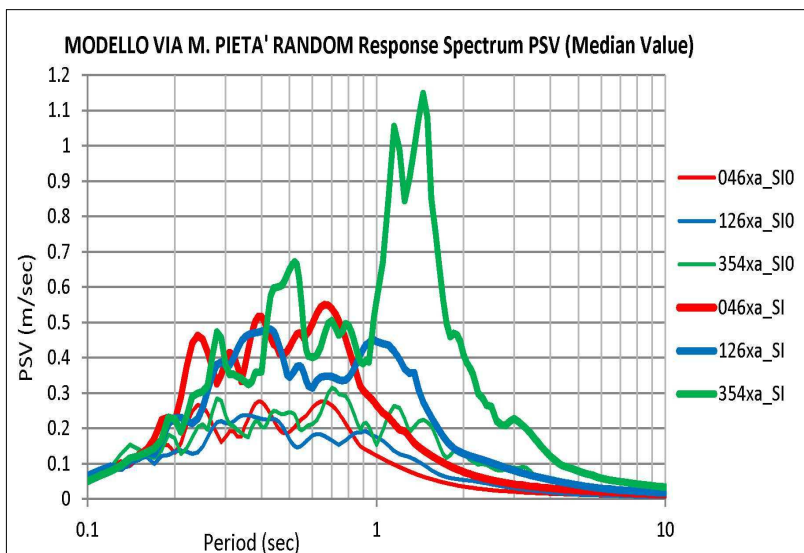
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI RSL (RICAVATE CON DIFFERENTI LIVELLI ENERGETICI DI SCUOTIMENTO SISMICO) E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DALLE REGISTRAZIONI TROMOGRAFICHE AL SUOLO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT SISICI DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUODOBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):

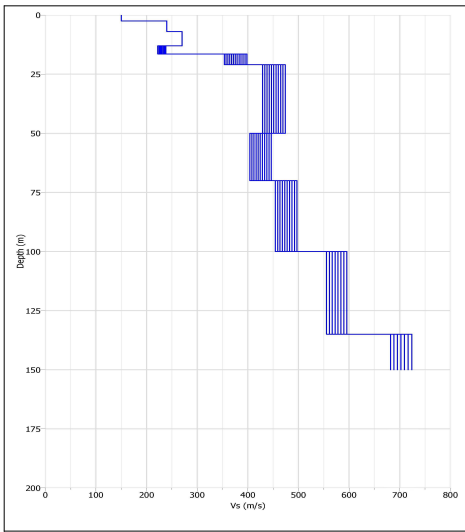


VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:

DAL 112/2007	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0
1-Input_046xa	1.8	2.1
2-Input_046xa	1.8	2.2
3-Input_354xa	1.8	2.0
<b>MEAN</b>	<b>1.8</b>	<b>2.1</b>

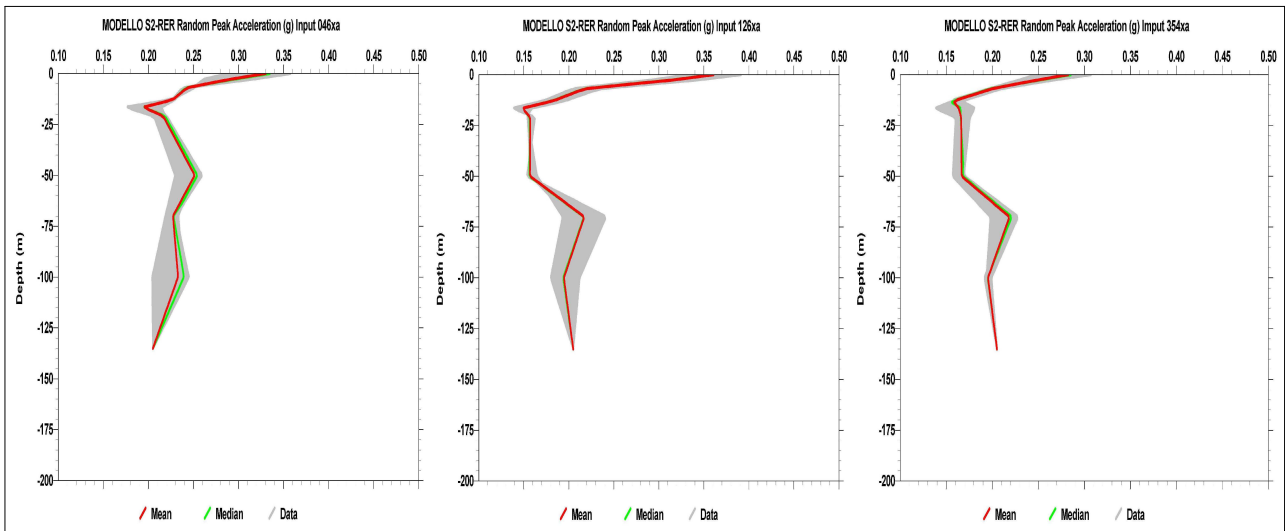
# MODELLO SHAKE: SONDAGGIO S2-RER

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:

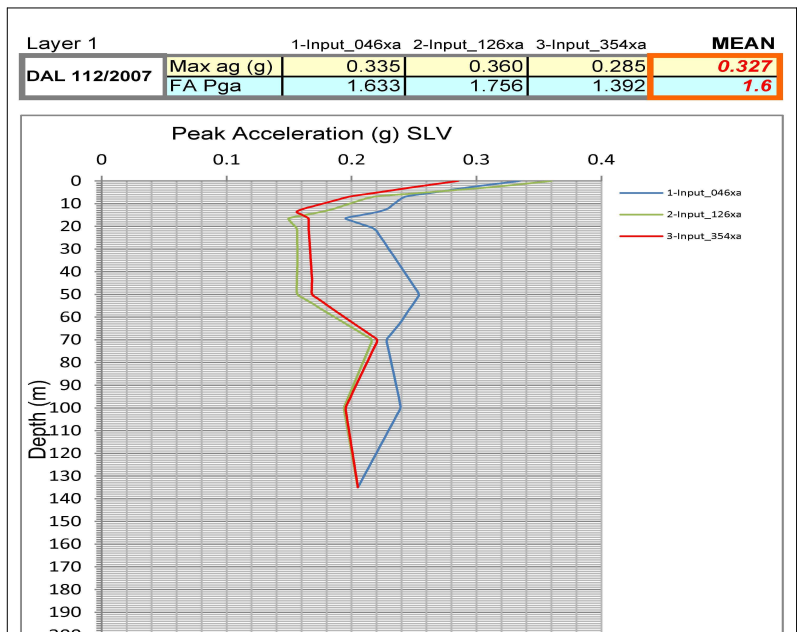


Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m^3)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve	
1	4	2,5		2,5	17,0	0,05	150		Soil PI=0	
2	4	4,5		7,0	18,0	0,05	240		Soil PI=0	
3	5	6,0		13,0	18,0	0,05	270		Soil PI=15	
4	5	3,5		16,5	18,0	0,05	230	±10	Soil PI=15	
5	7	4,5		21,0	20,0	0,05	375	±25	Gravel	
6	7	29,0		50,0	21,0	0,05	450	±25	Gravel	
7	4	20,0		70,0	20,0	0,05	425	±25	Soil PI=0	
8	5	30,0		100,0	20,0	0,05	475	±25	Soil PI=15	
9	5	35,0		135,0	21,0	0,05	575	±25	Soil PI=15	
10	Profondità vincolata pseudobedrock: -135 m							675	±50	

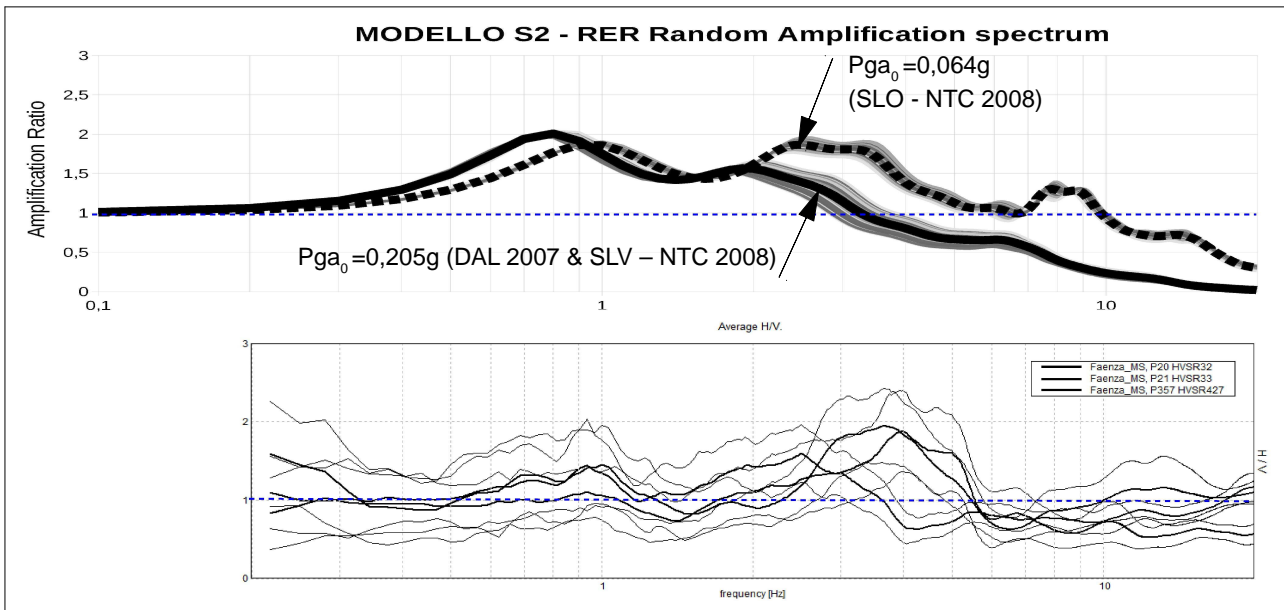
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO:



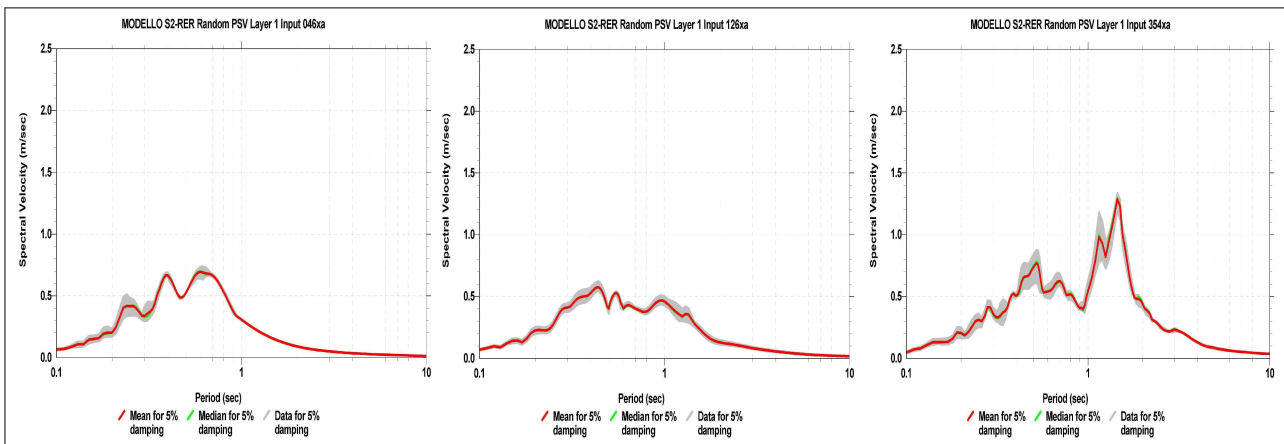
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (VALORI DI MEDIANA) VALORI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:



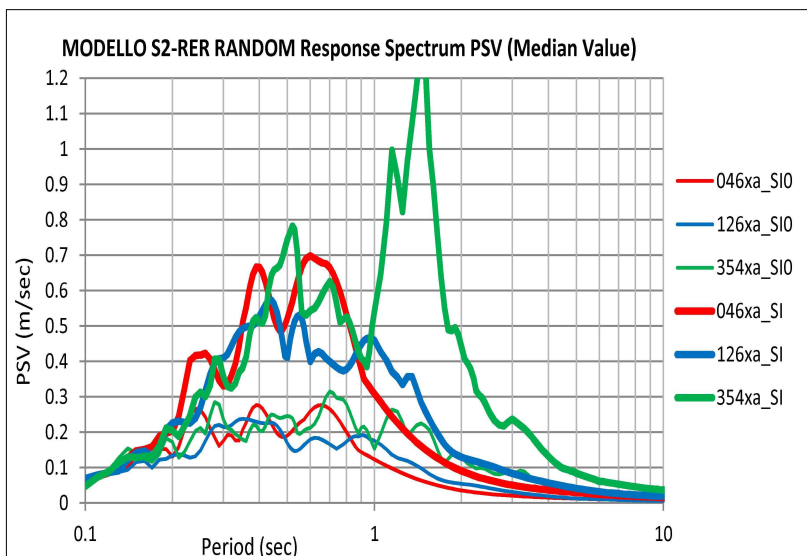
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI RSL (RICAVATE CON DIFFERENTI LIVELLI ENERGETICI DI SCUOTIMENTO SISMICO) E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DALLE REGISTRAZIONI TROMOGRAFICHE AL SUOLO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT SISICI DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUODOBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):



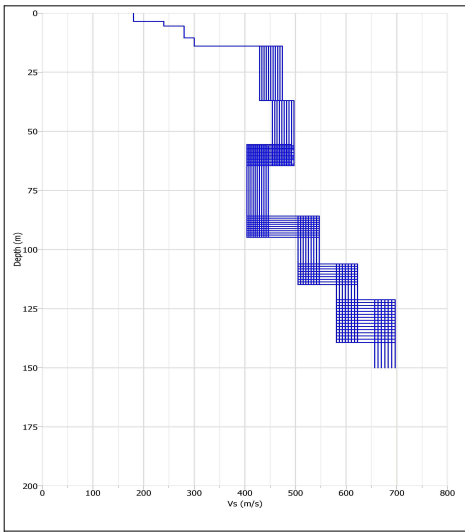
VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:

DAL 112/2007	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0
1-Input_046xa	2.0	2.6
2-Input_046xa	2.0	2.4
3-Input_354xa	1.9	2.2
<b>MEAN</b>	<b>2.0</b>	<b>2.4</b>



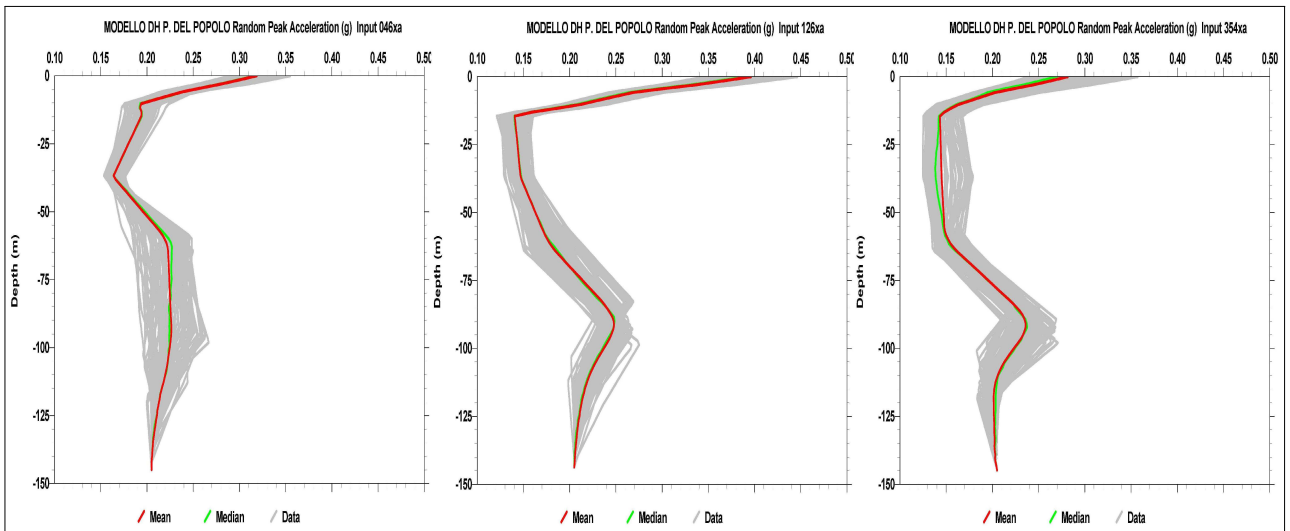
# MODELLO SHAKE: PIAZZA DEL POPOLO

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:

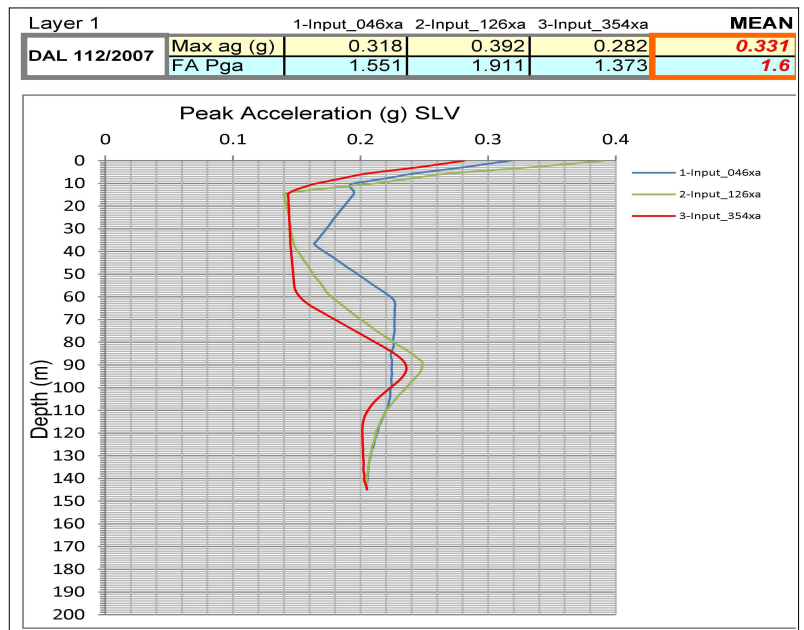


Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve	
1	4	3,5		3,5	16,0	0,05	180		Soil PI=0	
2	4	2,0		5,5	17,0	0,05	240		Soil PI=0	
3	8	5,0		10,5	17,0	0,05	280		Soil AL Faenza	
4	4	3,5		14,0	18,0	0,05	300		Soil PI=0	
5	7	23,0		27,0	21,0	0,05	450	±25	Gravel	
6	7	23,0	±5		22,0	0,05	475	±25	Gravel	
7	4	30,0	±5		21,0	0,05	425	±25	Soil PI=0	
8	5	20,0	±5		21,0	0,05	525	±25	Soil PI=15	
9	5	20,0	±10		21,0	0,05	600	±25	Soil PI=15	
13	Profondità vincolata pseudobedrock: -115÷145 m							675	±25	

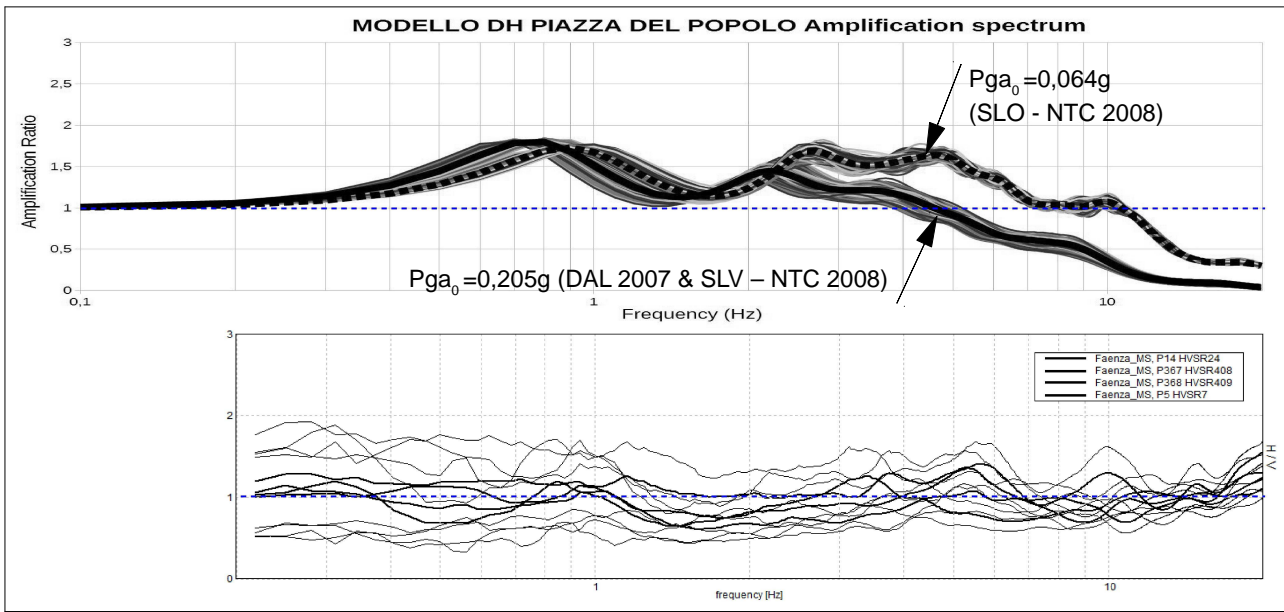
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO:



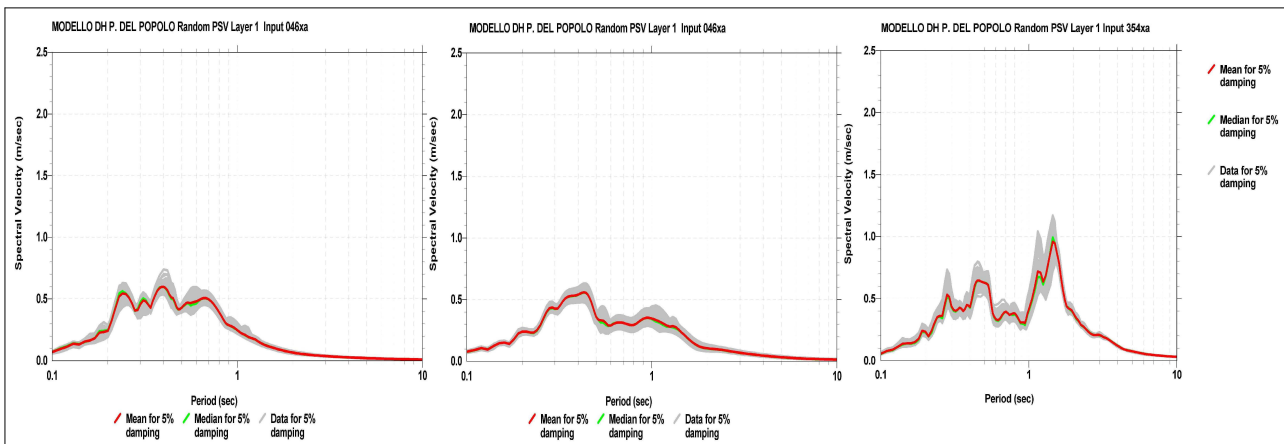
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (VALORI DI MEDIANA) VALORI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:



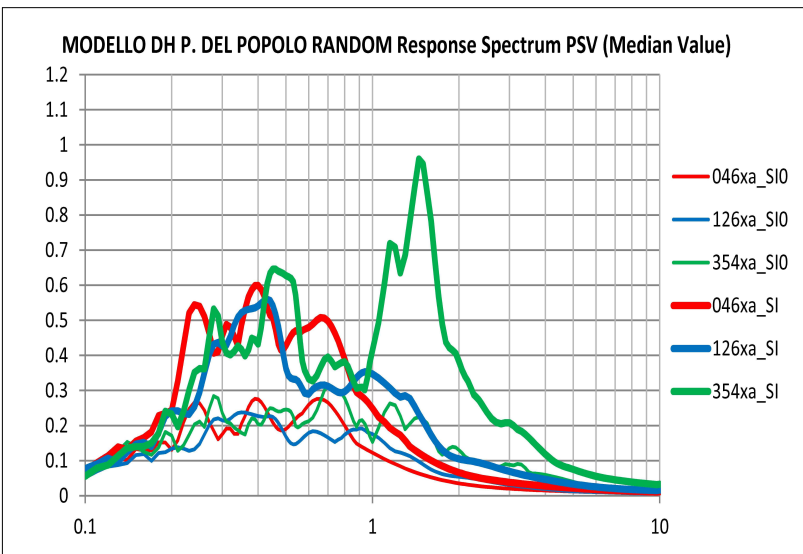
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI RSL (RICAVATE CON DIFFERENTI LIVELLI ENERGETICI DI SCUOTIMENTO SISMICO) E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DALLE REGISTRAZIONI TROMOGRAFICHE AL SUOLO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT SISIICI DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUODOBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):

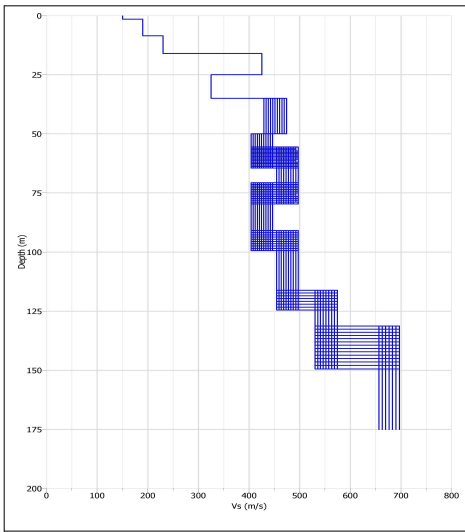


VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:

DAL 112/2007	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0
1-Input_046xa	2.1	1.9
2-Input_046xa	2.1	1.8
3-Input_354xa	2.0	1.6
<b>MEAN</b>	<b>2.1</b>	<b>1.8</b>

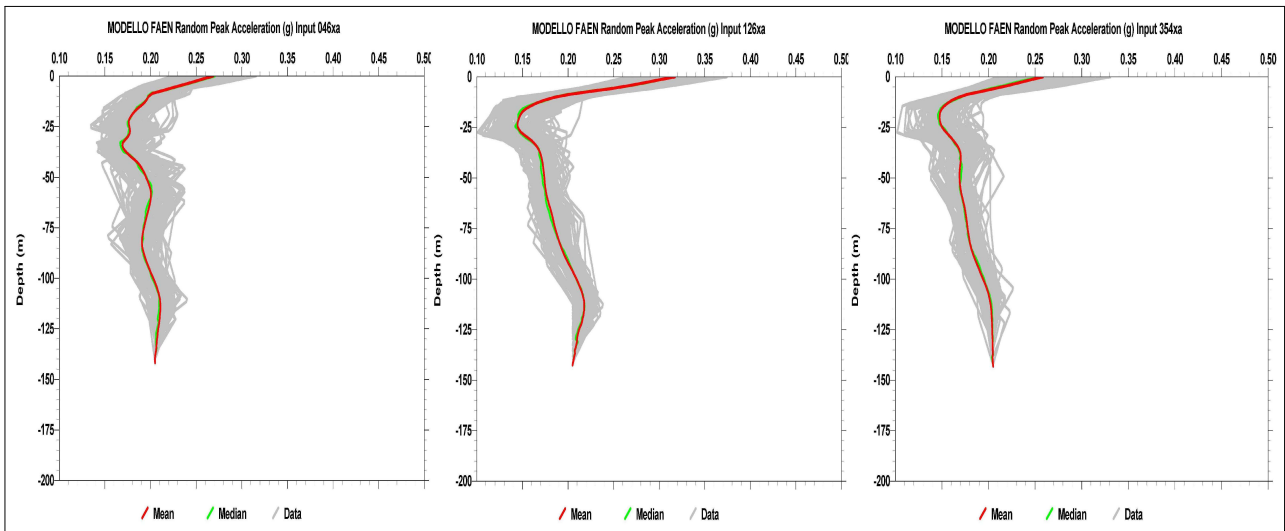
# MODELLO SHAKE: STAZIONE ACCELEROMETRICA FAEN

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:

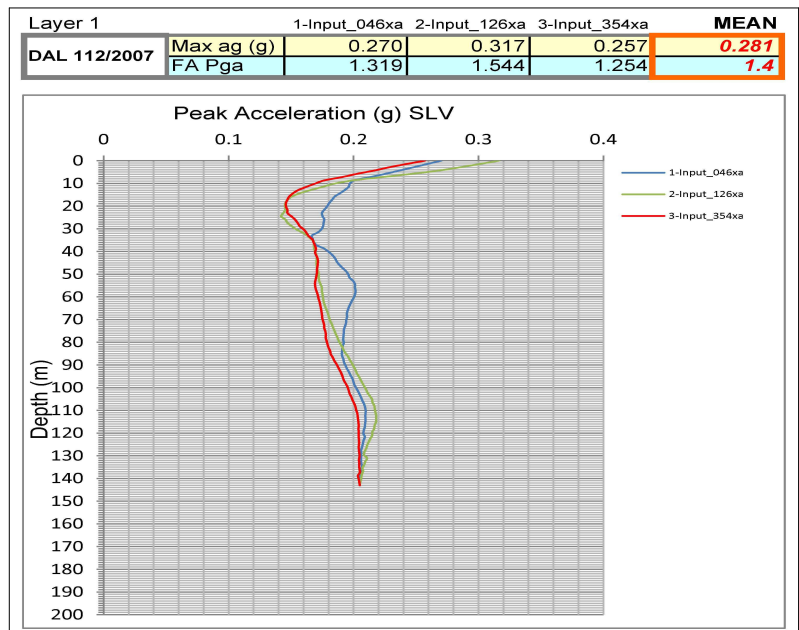


Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve	
1	4	5,0		5,0	16,0	0,05	220		Soil PI=0	
2	5	4,0		9,0	18,0	0,05	250		Soil PI=15	
3	4	6,0	±5	15,0	18,0	0,05	280		Soil PI=0	
4	3	10,0	±5	25,0	20,0	0,05	375	±25	Sand Upper	
5	4	5,0	±2	30,0	19,0	0,05	325	±25	Soil PI=0	
6	7	10,0	±5	40,0	20,0	0,05	425	±25	Gravel	
7	7	20,0	±5	60,0	21,0	0,05	450	±25	Gravel	
8	5	25,0	±5	85,0	20,0	0,05	425	±25	Soil PI=15	
9	3	25,0	±5	110,0	21,0	0,05	500	±25	Sand Upper	
10	5	15,0	±10	125,0	21,0	0,05	575	±25	Soil PI=15	
11	Profondità vincolata pseudobedrock: -105÷145 m							650	±25	

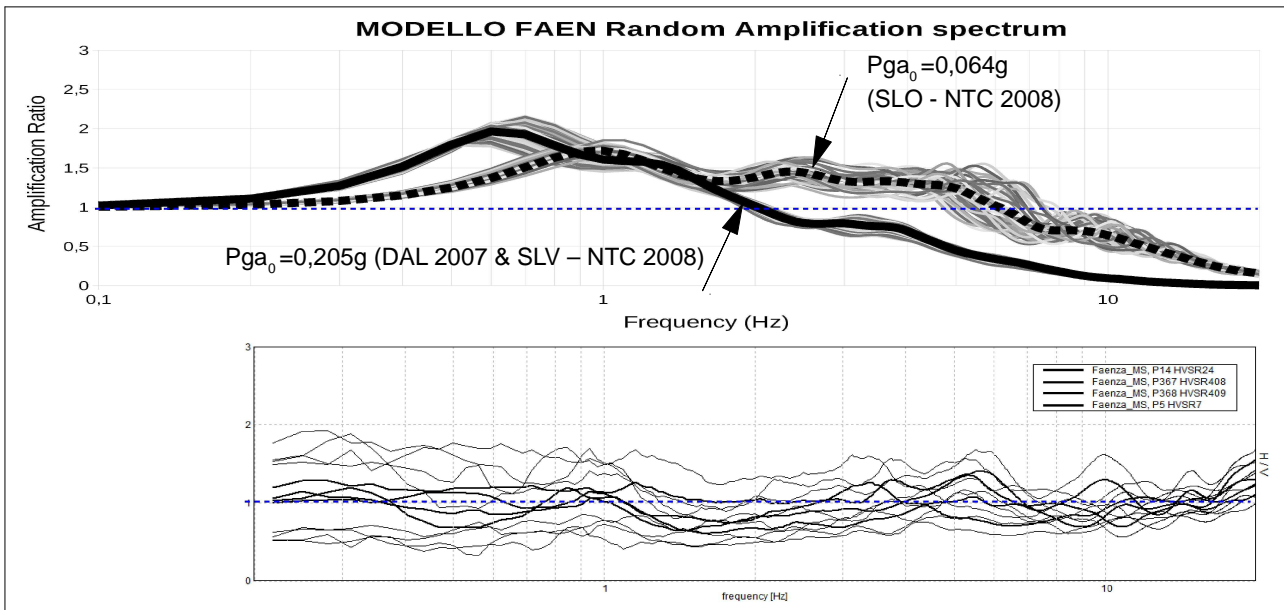
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO:



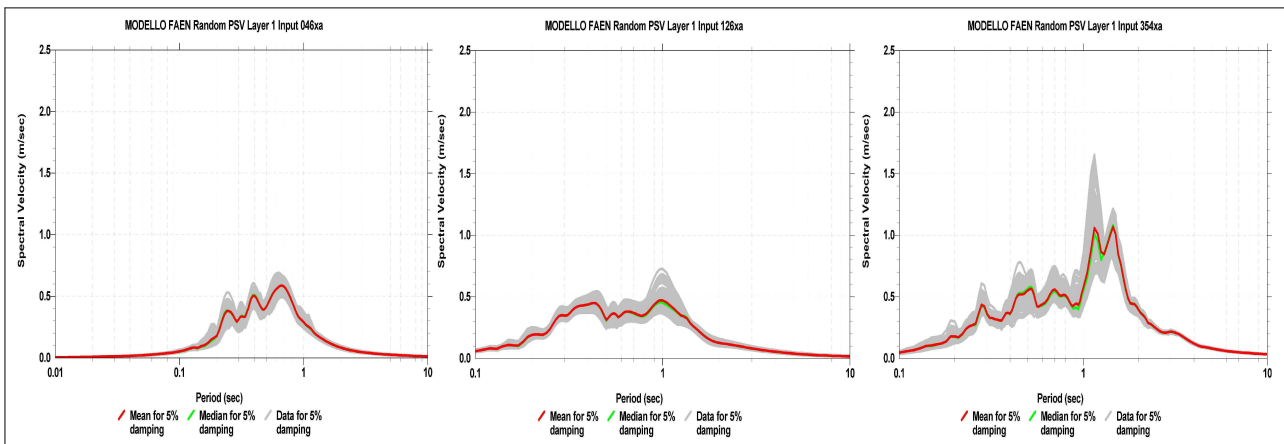
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (VALORI DI MEDIANA) VALORI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:



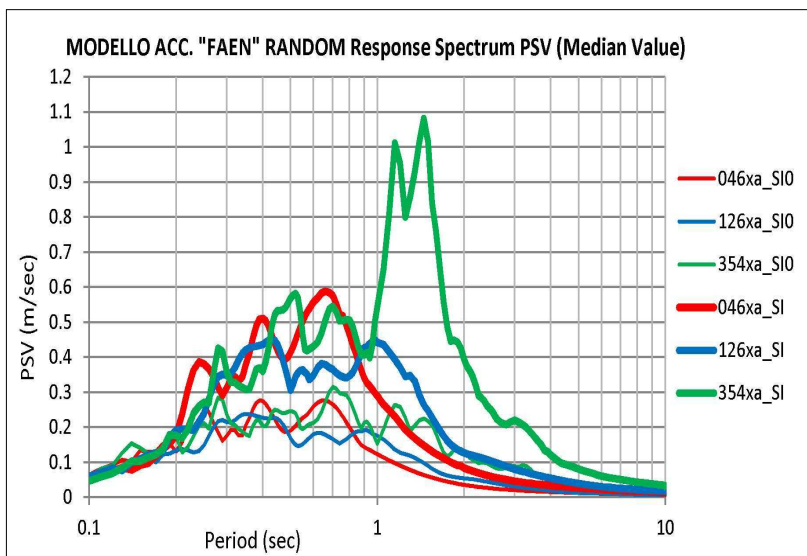
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI RSL (RICAVATE CON DIFFERENTI LIVELLI ENERGETICI DI SCUOTIMENTO SISMICO) E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DALLE REGISTRAZIONI TROMOGRAFICHE AL SUOLO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT SISICI DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUODOBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):

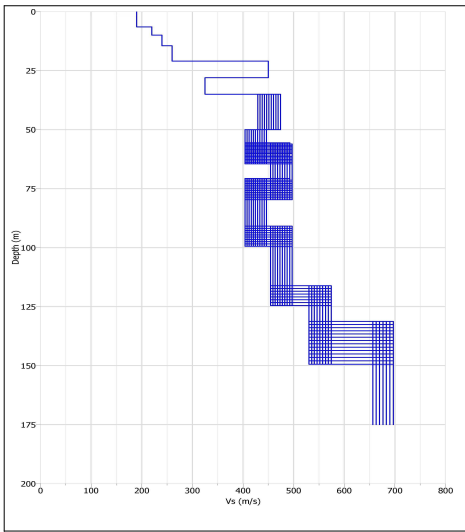


VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:

DAL 112/2007	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0
1-Input_046xa	1.7	2.2
2-Input_046xa	1.7	2.2
3-Input_354xa	1.6	1.9
<b>MEAN</b>	<b>1.7</b>	<b>2.1</b>

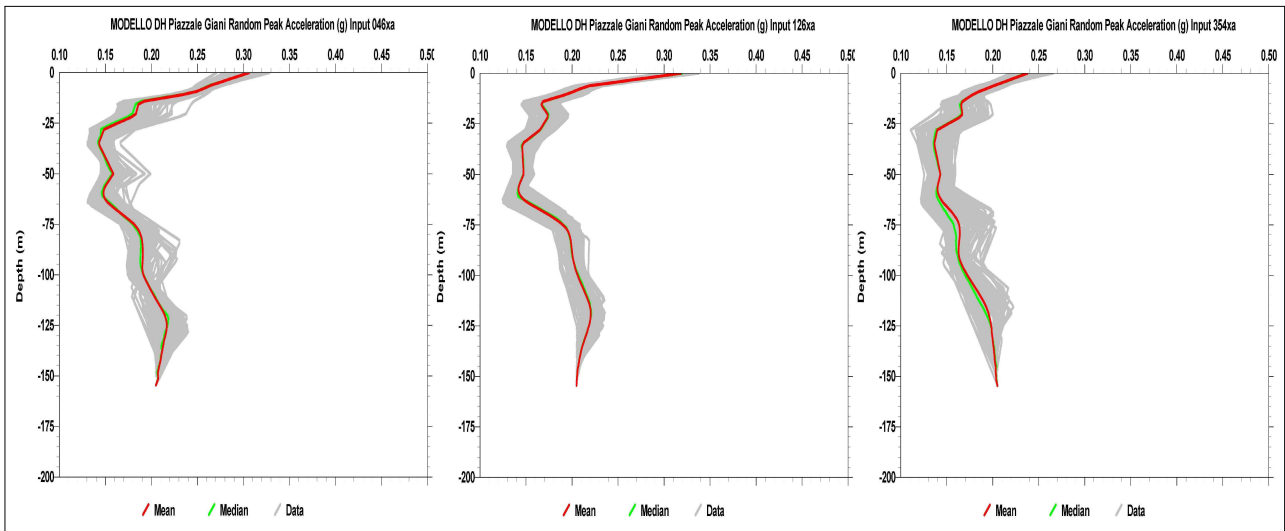
## MODELLO SHAKE: DOWH-HOLE PIAZZALE GIANI

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:

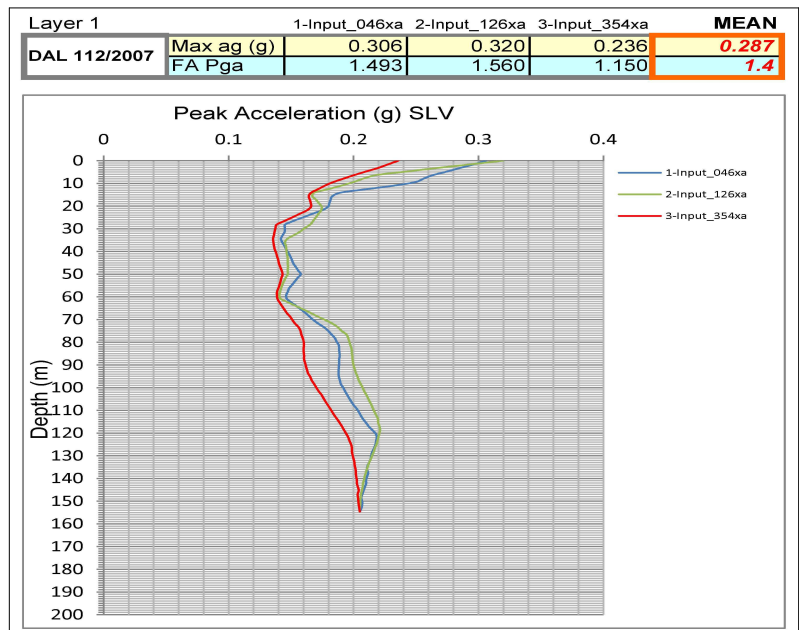


Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve	
1	5	6,5		6,5	17,0	0,05	190		Soil PI=15	
2	8	3,5		10,0	17,0	0,05	220		Soil PI=0	
3	4	4,5		14,5	18,0	0,05	240		Soil AL Faenza	
4	8	6,5		21,0	18,0	0,05	260		Soil AL Faenza	
5	7	7,0		28,0	21,0	0,05	450		Gravel	
6	5	7,0		35,0	19,0	0,05	325		Soil PI=15	
7	7	15,0		50,0	21,0	0,05	450	±25	Gravel	
8	5	10,0	±5		20,0	0,05	425	±25	Soil PI=15	
9	7	15,0	±5		21,0	0,05	475	±25	Gravel	
10	5	20,0	±5		20,0	0,05	425	±25	Soil PI=15	
11	3	25,0	±5		21,0	0,05	475	±25	Sand Upper	
12	5	20,0	±10		21,0	0,05	550	±25	Soil PI=15	
13	Profondità vincolata pseudobedrock: -125÷155 m							675	±25	

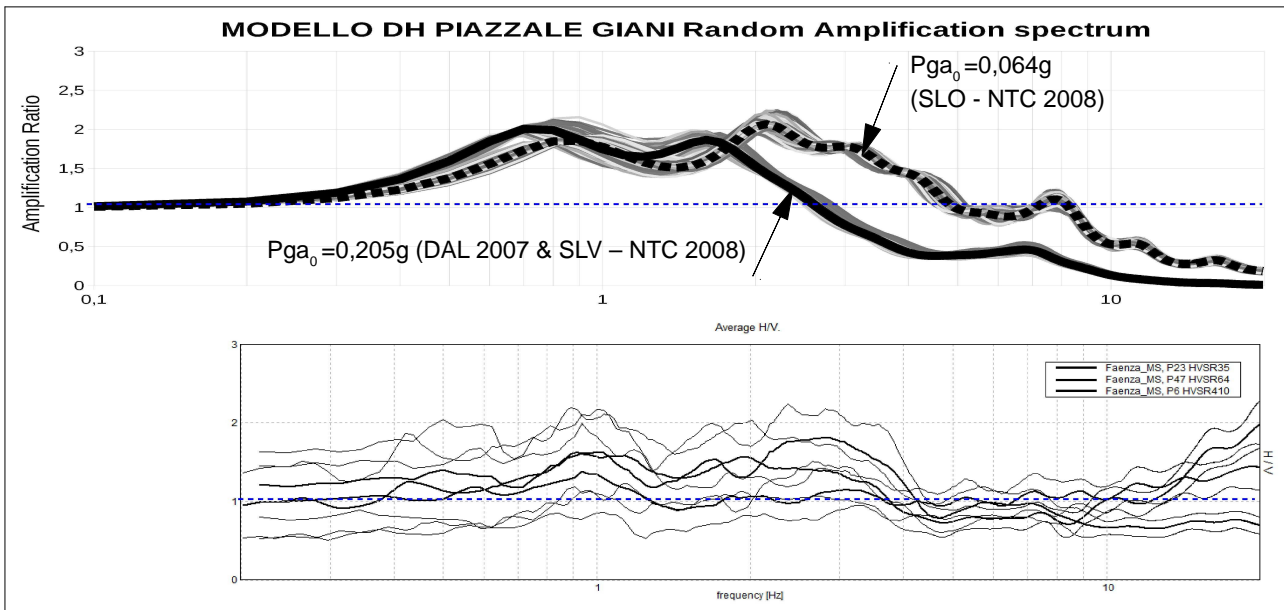
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO:



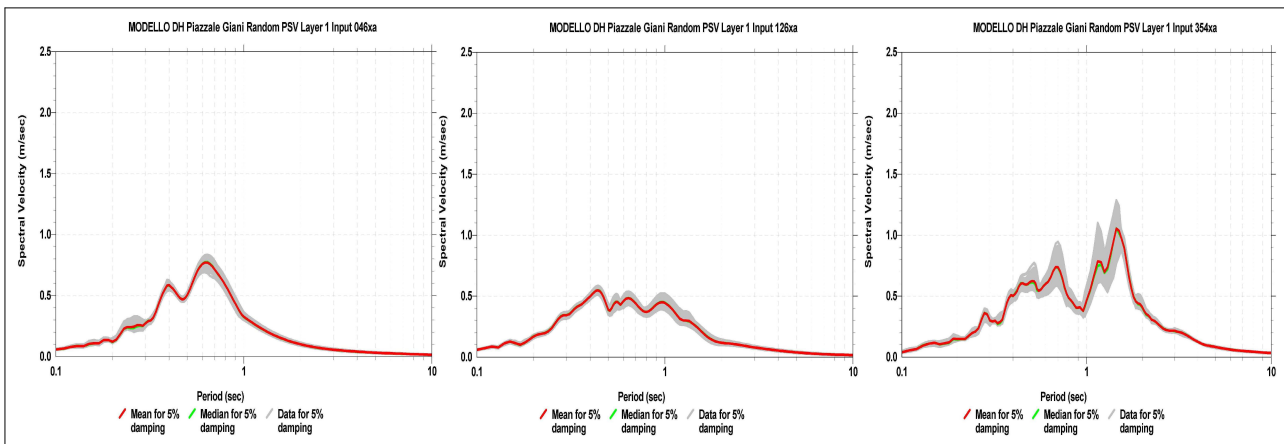
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (VALORI DI MEDIANA) VALORI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:



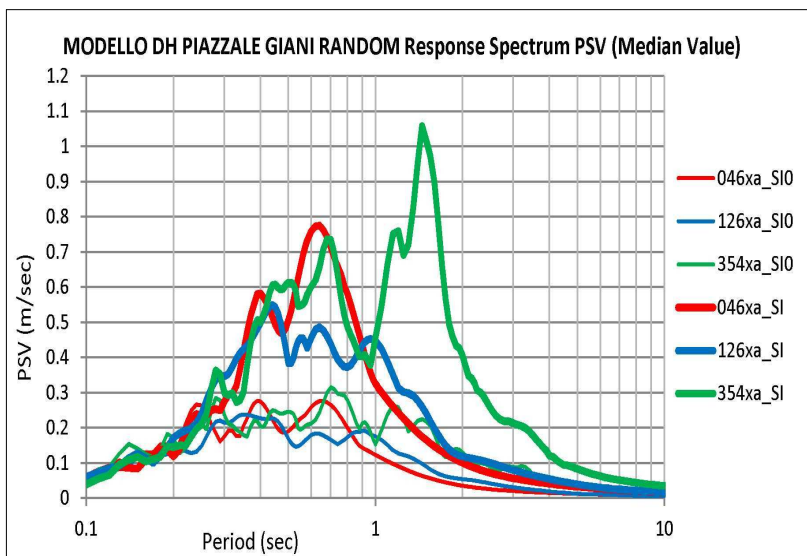
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI RSL (RICAVATE CON DIFFERENTI LIVELLI ENERGETICI DI SCUOTIMENTO SISMICO) E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DALLE REGISTRAZIONI TROMOGRAFICHE AL SUOLO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT SISICI DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUODOBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):

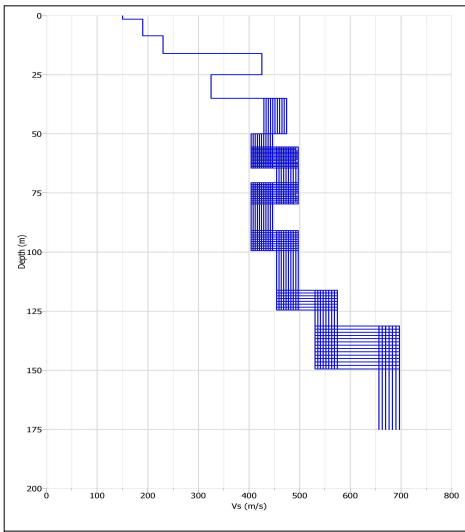


VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:

DAL 112/2007	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0
1-Input_046xa	1.7	2.8
2-Input_046xa	1.8	2.4
3-Input_354xa	1.7	2.3
<b>MEAN</b>	<b>1.7</b>	<b>2.5</b>

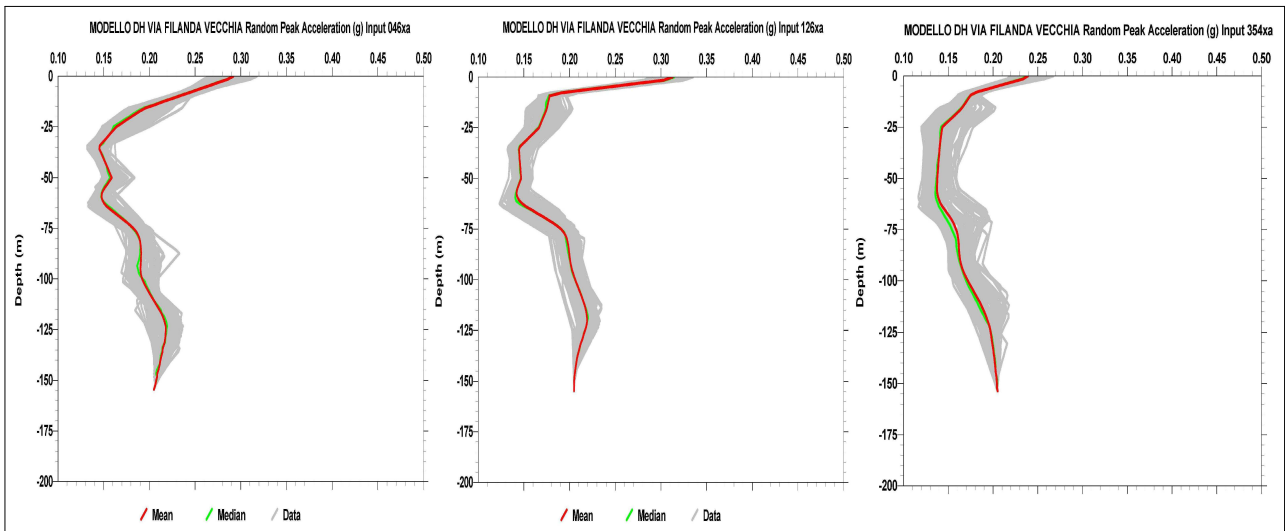
# MODELLO SHAKE: DOWH-HOLE VIA FILANDA VECCHIA

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:

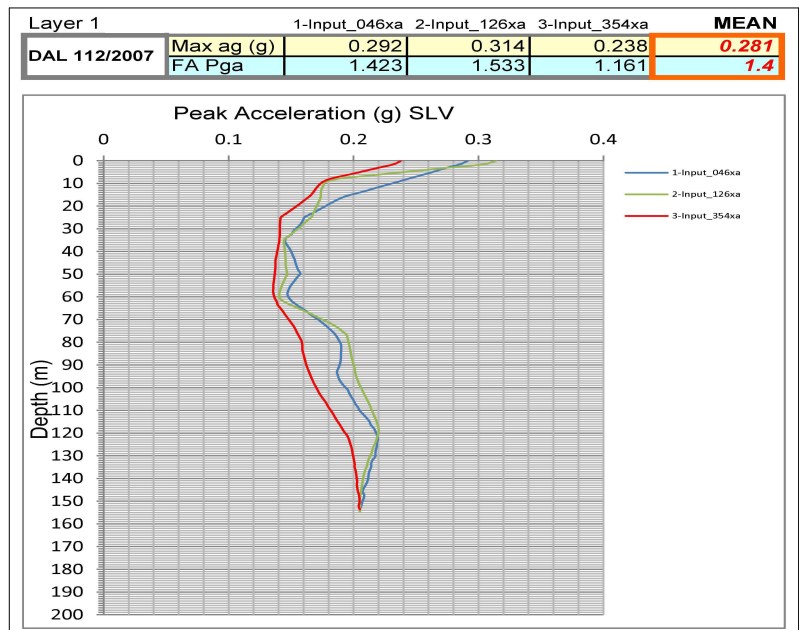


Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve	
1	4	1,5		1,5	16,0	0,05	150		Soil PI=0	
2	5	7,0		8,5	18,0	0,05	190		Soil PI=15	
3	2	7,5		16,0	19,0	0,05	230		Sand AVG	
4	7	9,0		25,0	20,0	0,05	425		Gravel	
5	5	10,0		35,0	19,0	0,05	325		Soil PI=15	
6	7	15,0		50,0	21,0	0,05	450	±25	Gravel	
7	5	10,0	±5		20,0	0,05	425	±25	Soil PI=15	
8	7	15,0	±5		21,0	0,05	475	±25	Gravel	
9	5	20,0	±5		20,0	0,05	425	±25	Soil PI=15	
10	3	25,0	±5		21,0	0,05	475	±25	Sand Upper	
11	5	20,0	±10		21,0	0,05	550	±25	Soil PI=15	
12	Profondità vincolata pseudobedrock: -125÷155 m							675	±25	

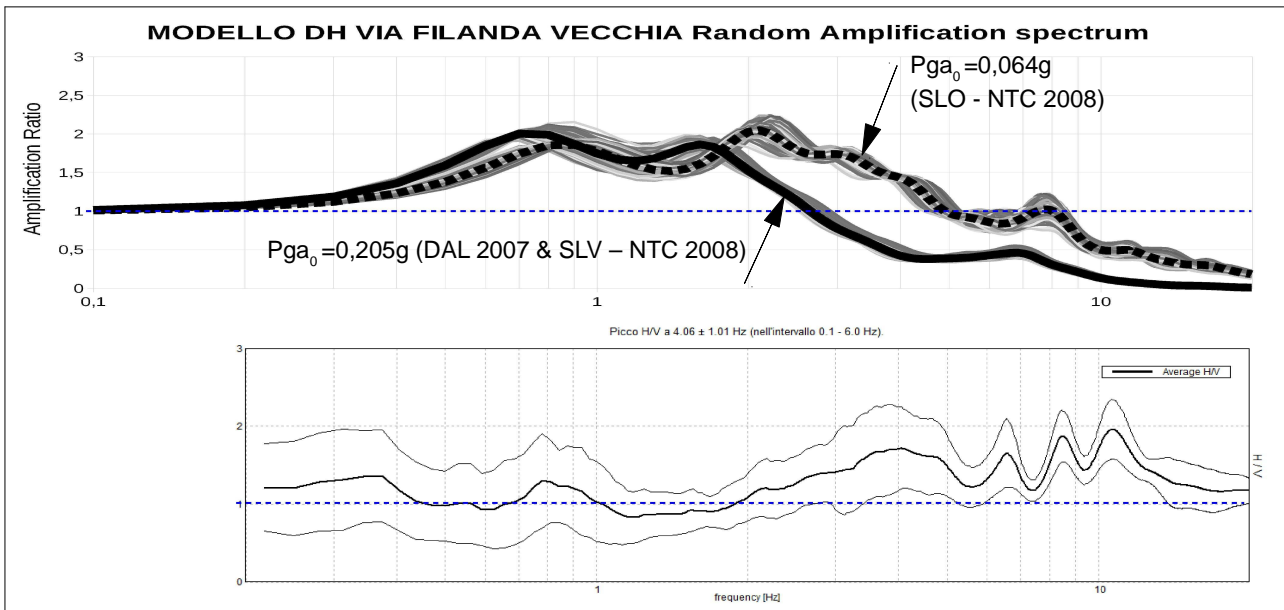
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO:



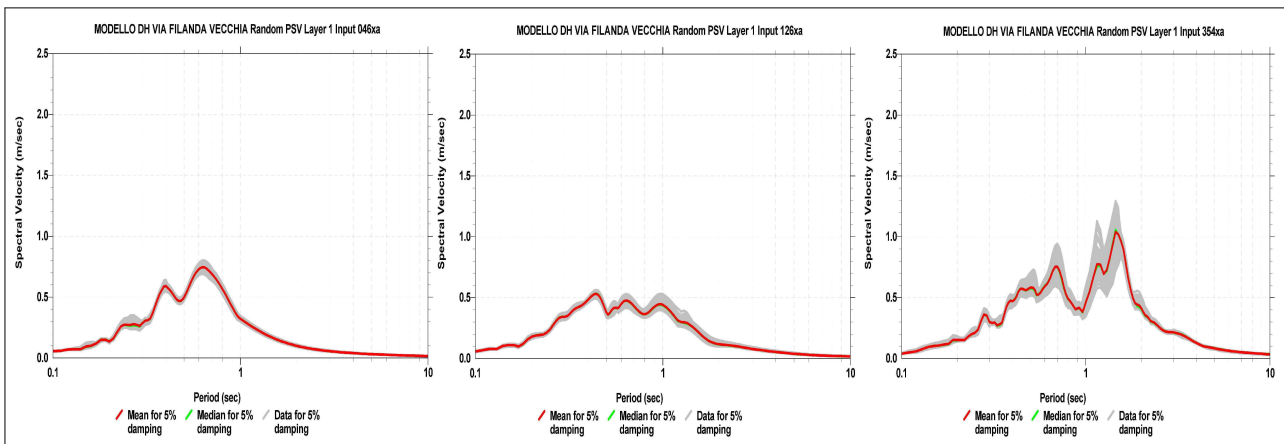
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (VALORI DI MEDIANA) VALORI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:



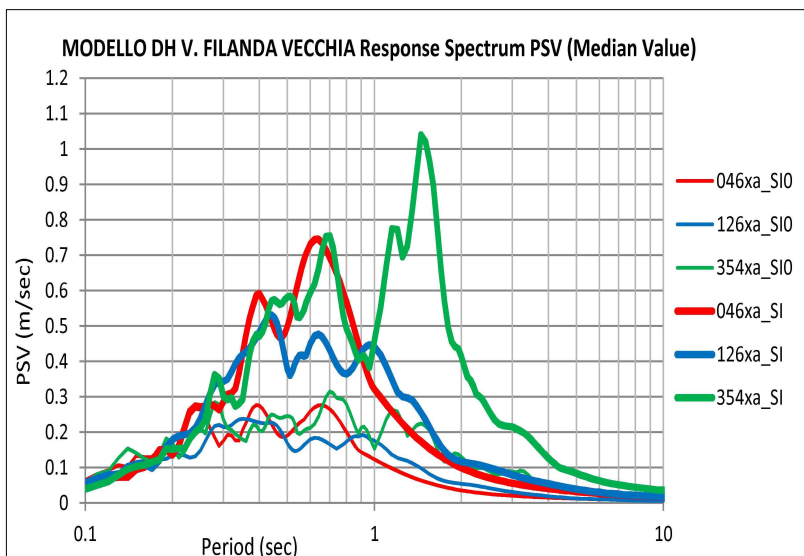
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI RSL (RICAVATE CON DIFFERENTI LIVELLI ENERGETICI DI SCUOTIMENTO SISMICO) E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DALLE REGISTRAZIONI TROMOGRAFICHE AL SUOLO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT SISICI DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUODOBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):



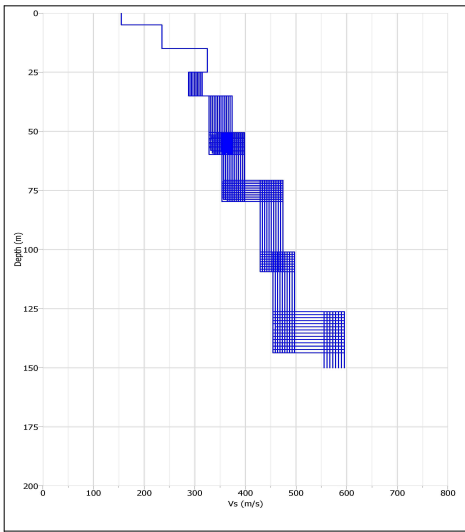
VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:

DAL 112/2007	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0
1-Input_046xa	1,7	2,8
2-Input_046xa	1,8	2,4
3-Input_354xa	1,6	2,3
<b>MEAN</b>	<b>1,7</b>	<b>2,5</b>



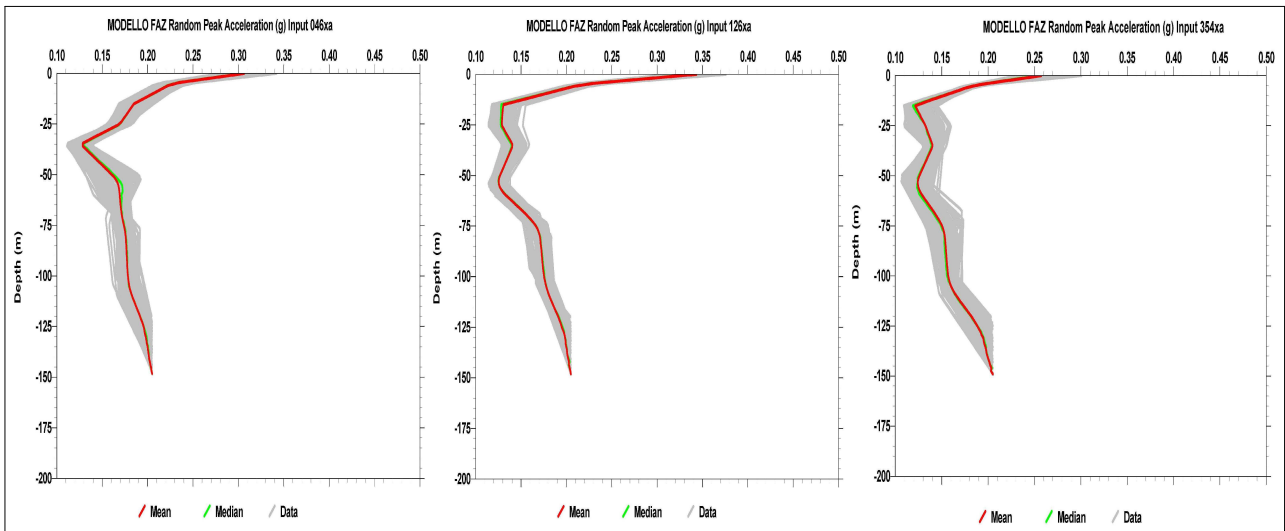
# MODELLO SHAKE: STAZIONE ACCELEROMETRICA FAZ

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:

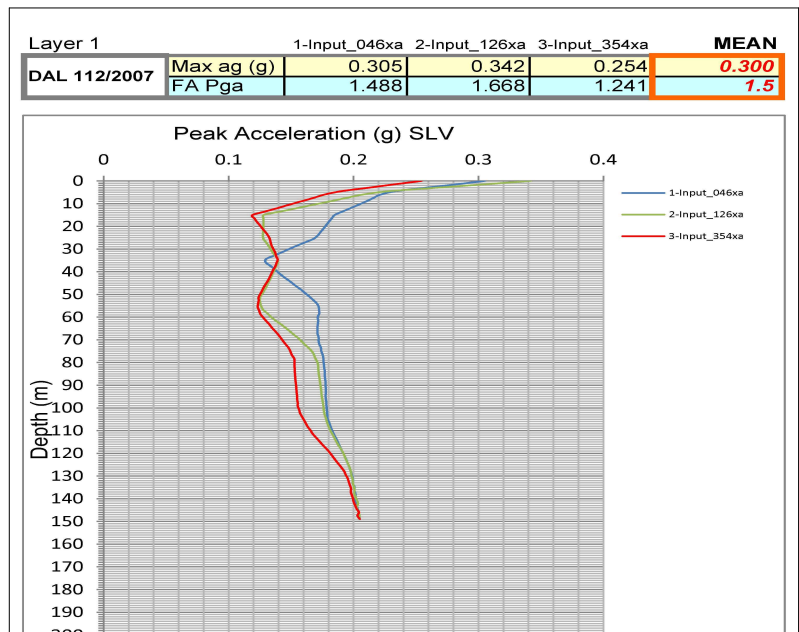


Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve	
1	4	5,0		5,0	17,0	0,05	165		Soil PI=0	
2	5	10,0		15,0	18,0	0,05	235		Soil PI=15	
3	2	10,0		25,0	19,0	0,05	325		Sand Avg	
4	5	10,0		35,0	19,0	0,05	300	±15	Soil PI=15	
5	5	20,0	±5	55,0	19,0	0,05	350	±25	Soil PI=15	
6	3	20,0	±5	75,0	20,0	0,05	375	±25	Sand Upper	
7	5	30,0	±5	105,0	20,0	0,05	450	±25	Soil PI=15	
8	3	30,0	±10	135,0	20,0	0,05	500	±25	Sand Upper	
9	Profondità vincolata pseudobedrock: -120±150 m							575	±25	

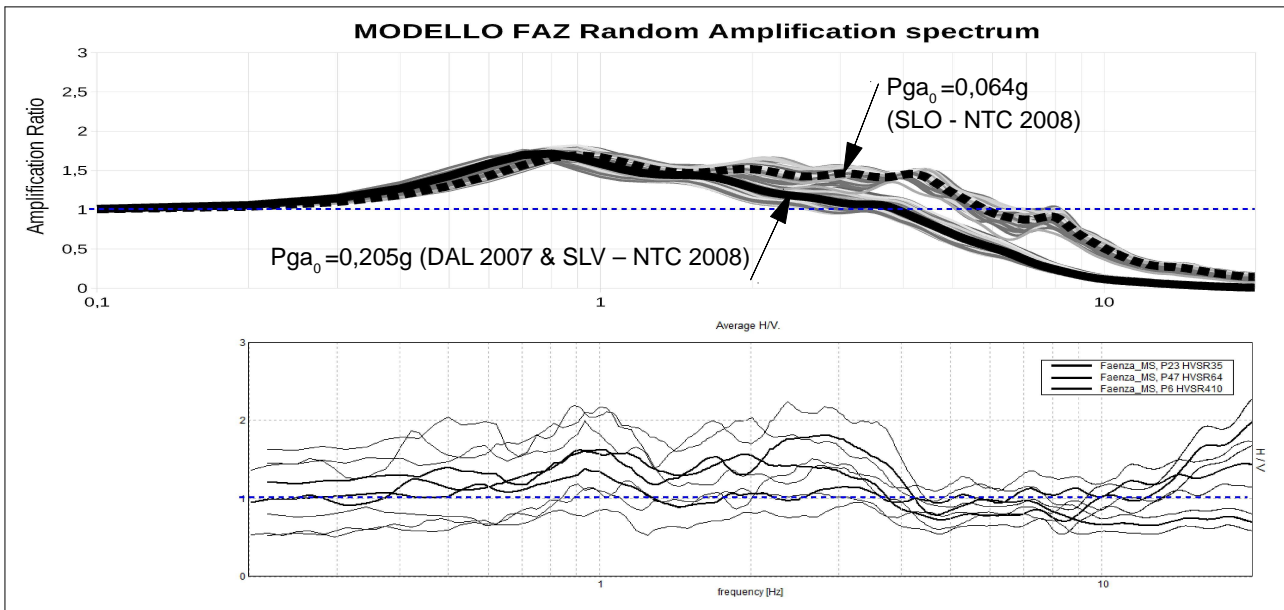
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO:



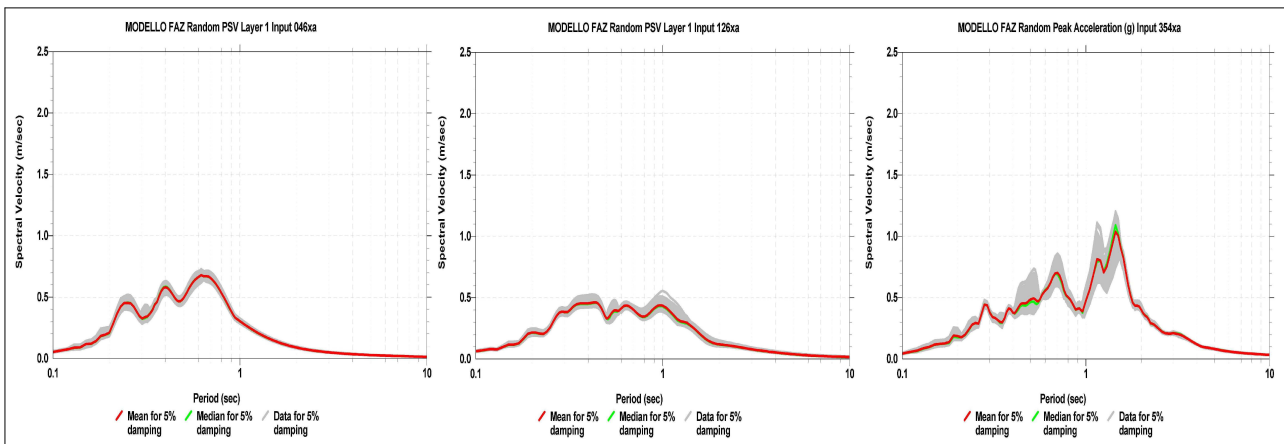
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (VALORI DI MEDIANA) VALORI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:



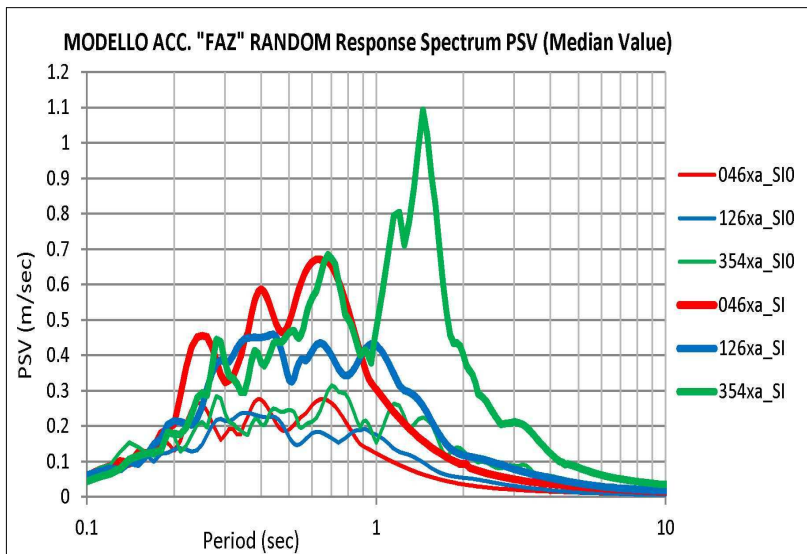
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI RSL (RICAVATE CON DIFFERENTI LIVELLI ENERGETICI DI SCUOTIMENTO SISMICO) E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DALLE REGISTRAZIONI TROMOGRAFICHE AL SUOLO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT SISICI DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUODOBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):

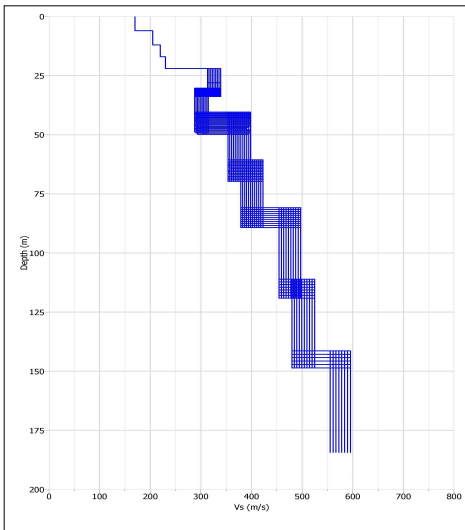


VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:

DAL 112/2007	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0
1-Input_046xa	1.9	2.5
2-Input_046xa	1.8	2.3
3-Input_354xa	1.5	2.2
<b>MEAN</b>	<b>1.7</b>	<b>2.3</b>

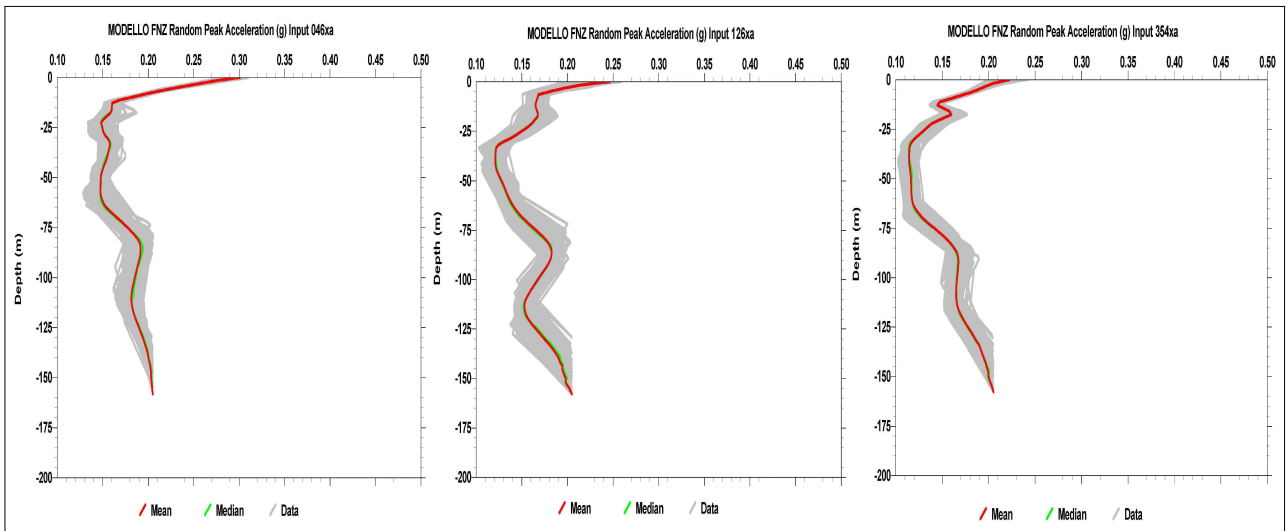
# MODELLO SHAKE: STAZIONE ACCELEROMETRICA FNZ

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:

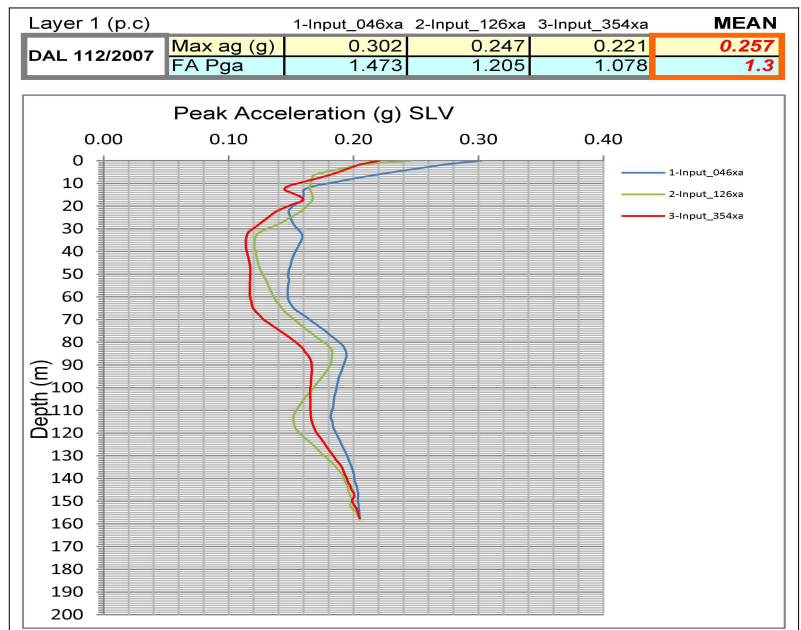


Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve	
1	4	6,0		6,0	17,0	0,05	170		Soil PI=0	
2	5	6,0		12,0	17,0	0,05	205		Soil PI=15	
3	4	5,0		17,0	18,0	0,05	220		Soil PI=0	
4	5	5,0		22,0	18,0	0,05	230		Soil PI=15	
5	3	6,0		28,0	20,0	0,05	325	±15	Sand Upper	
6	3	4,0	±2	32,0	19,0	0,05	325	±15	Sand Upper	
7	5	13,0	±5	45,0	19,0	0,05	300	±15	Soil PI=15	
8	5	20,0	±5	65,0	19,0	0,05	375	±25	Soil PI=15	
9	4	20,0	±5	85,0	19,0	0,05	400	±25	Soil PI=0	
10	5	30,0	±5	115,0	20,0	0,05	475	±25	Soil PI=15	
11	3	30,0	±5	145,0	20,0	0,05	500	±25	Sand Upper	
12	Profondità vincolata pseudobedrock: -155÷185 m							575	±25	

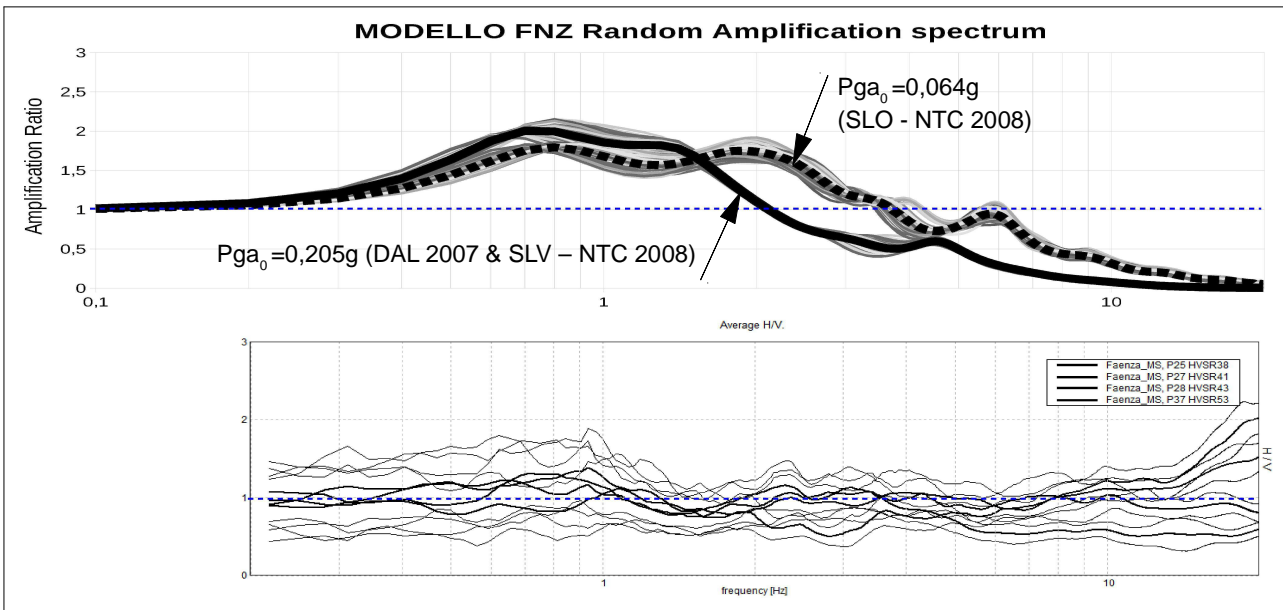
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO:



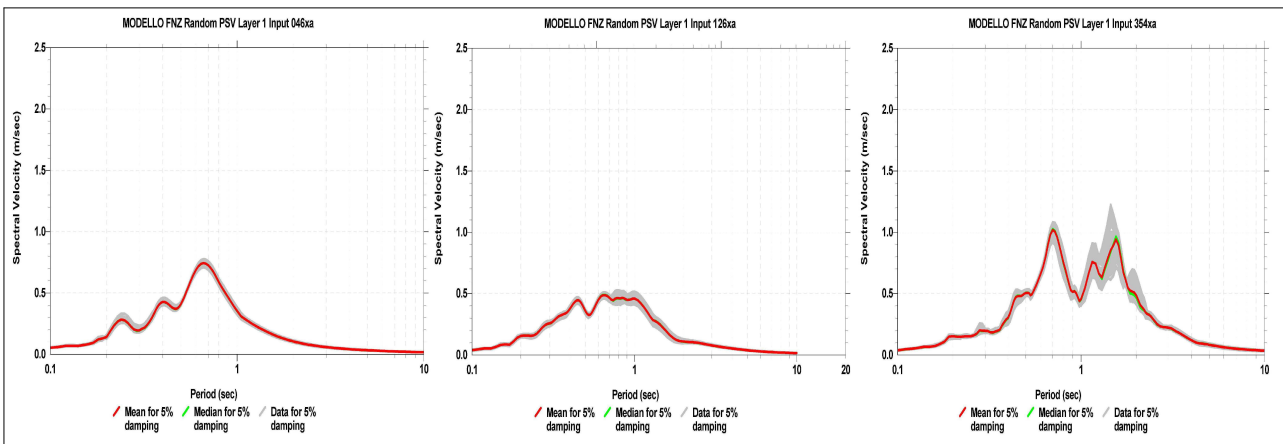
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (VALORI DI MEDIANA) VALORI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:



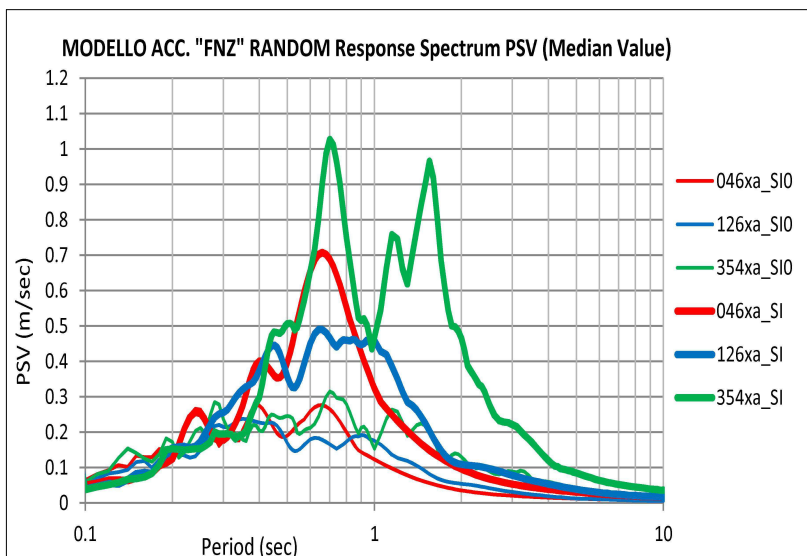
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI RSL (RICAVATE CON DIFFERENTI LIVELLI ENERGETICI DI SCUOTIMENTO SISMICO) E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DALLE REGISTRAZIONI TROMOGRAFICHE AL SUOLO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT SISICI DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUODOBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):

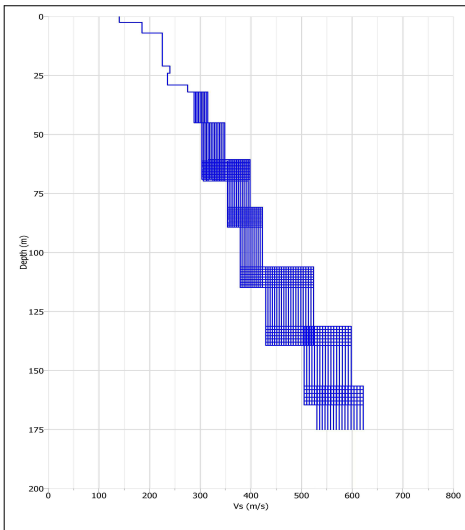


VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:

DAL 112/2007	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0
1-Input_046xa	1,3	2,6
2-Input_046xa	1,4	2,5
3-Input_354xa	1,3	2,8
<b>MEAN</b>	<b>1,3</b>	<b>2,6</b>

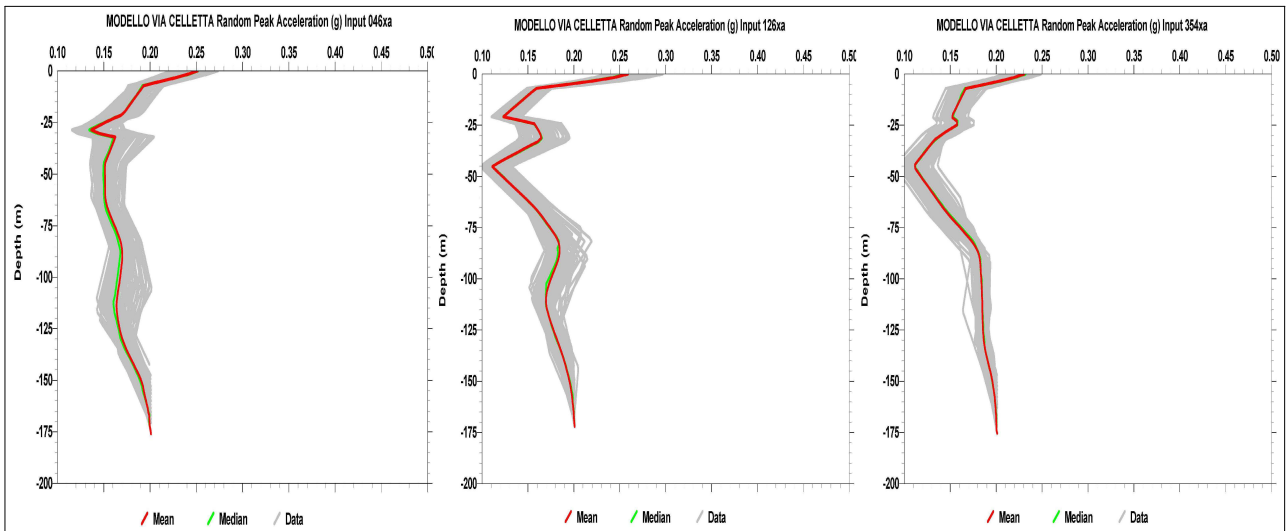
# MODELLO SHAKE: VIA CELLETTA

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:

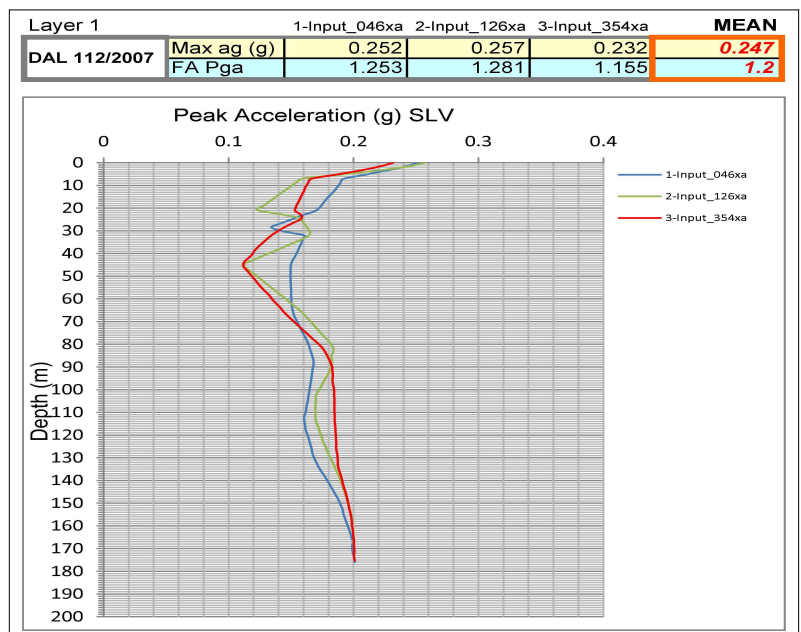


Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	5	2,5		2,5	16,0	0,05	140		Soil PI=15
2	5	4,5		7,0	17,0	0,05	185		Soil PI=15
3	5	14,0		21,0	18,0	0,05	225		Soil PI=15
4	2	3,0		24,0	19,0	0,05	240		Sand avg
5	5	5,0		29,0	18,0	0,05	235		Soil PI=15
6	2	3,0		32,0	19,0	0,05	275		Sand avg
7	5	13,0		45,0	19,0	0,05	300	±15	Soil PI=15
8	5	20,0	±5		19,0	0,05	325	±25	Soil PI=15
9	4	20,0	±5		20,0	0,05	375	±25	Soil PI=0
10	5	25,0	±5		20,0	0,05	400	±25	Soil PI=15
11	3	25,0	±5		21,0	0,05	475	±50	Sand upper
12	4	25,0	±5		21,0	0,05	550	±50	Soil PI=0
Profondità vincolata pseudobedrock: -145÷175 m								575	±50

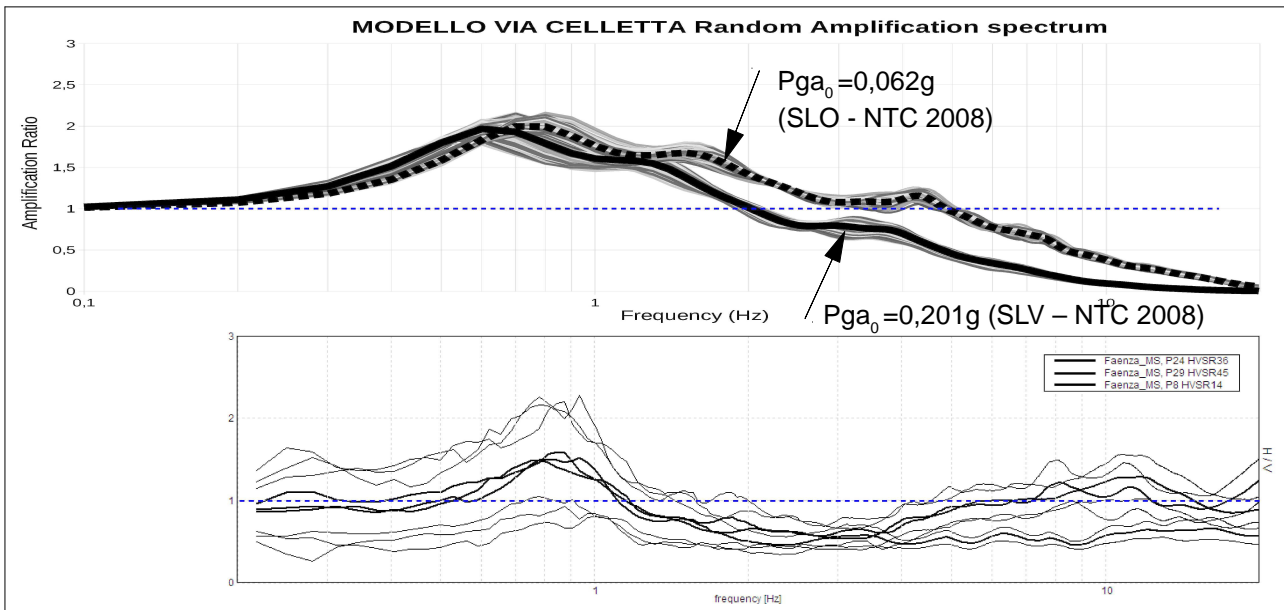
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO:



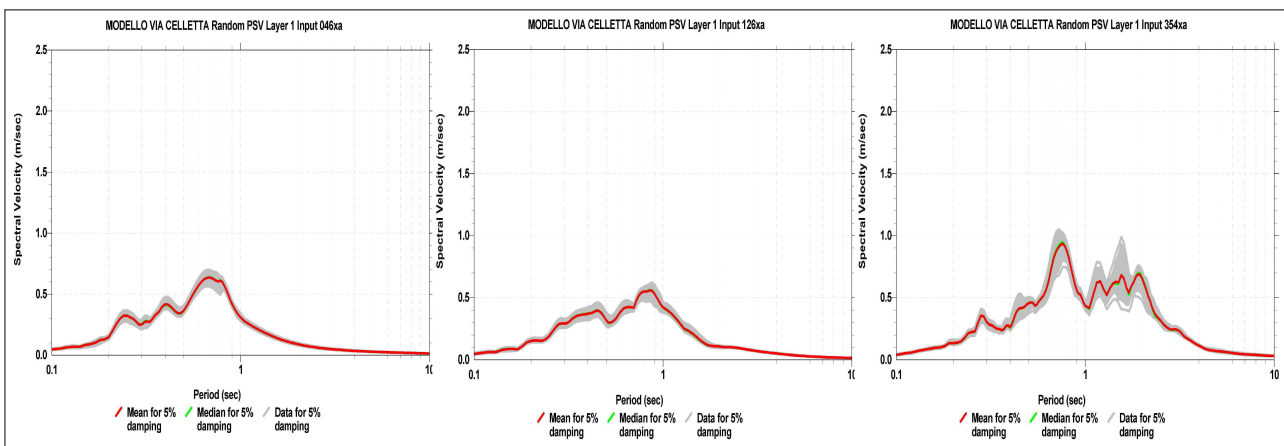
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (VALORI DI MEDIANA) VALORI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:



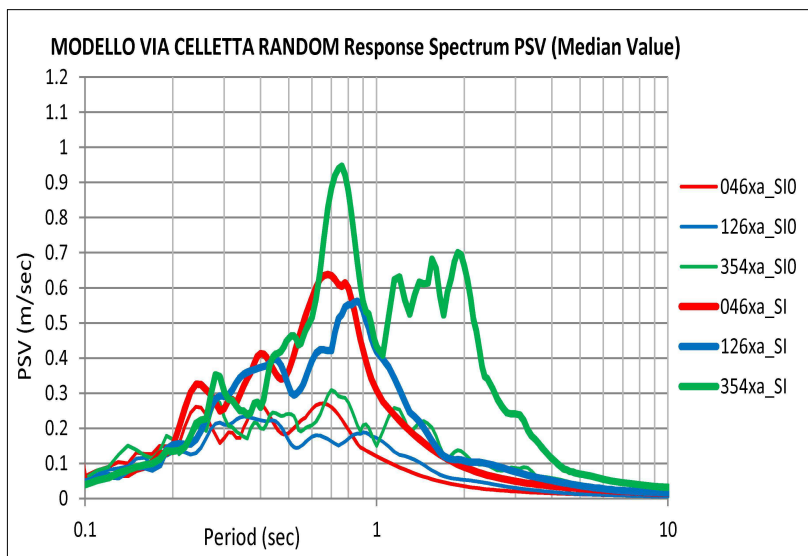
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI RSL (RICAVATE CON DIFFERENTI LIVELLI ENERGETICI DI SCUOTIMENTO SISMICO) E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DALLE REGISTRAZIONI TROMOGRAFICHE AL SUOLO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT SISICI DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUODOBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):

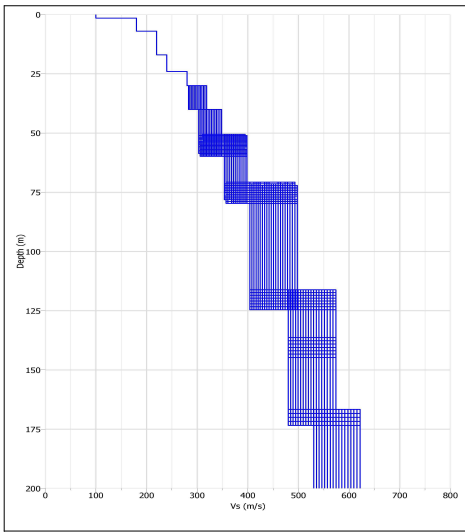


VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:

DAL 112/2007	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0
1-Input_046xa	1.4	2.6
2-Input_046xa	1.5	2.7
3-Input_354xa	1.3	2.8
<b>MEAN</b>	<b>1.4</b>	<b>2.7</b>

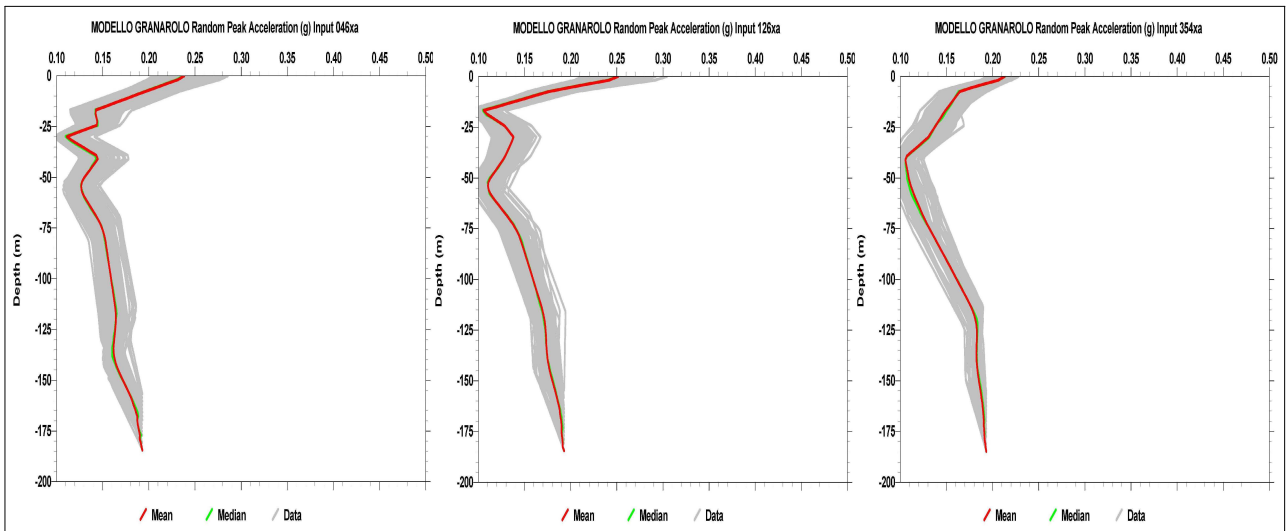
# MODELLO SHAKE: GRANAROLO FAENTINO

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:

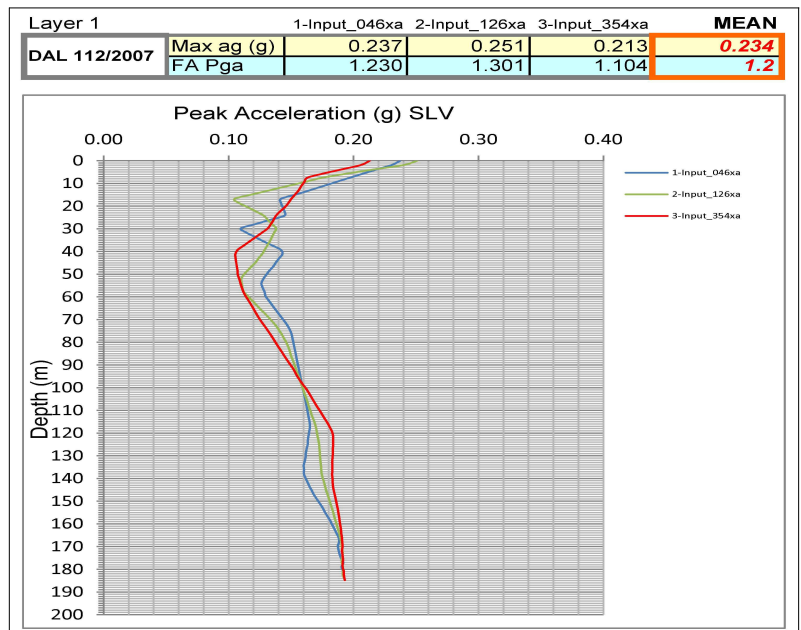


Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m^3)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	4	1,5		1,5	16,0	0,05	150		Soil PI=0
2	6	5,5		7,0	17,0	0,05	180		Soil PI=30
3	5	10,0		17,0	17,0	0,05	220		Soil PI=15
4	6	7,0		24,0	17,0	0,05	240		Soil PI=30
5	2	6,0		30,0	18,0	0,05	280		Sand avg
6	2	10,0		40,0	19,0	0,05	300	±20	Sand avg
7	5	15,0	±5		19,0	0,05	325	±25	Soil PI=15
8	3	20,0	±5		19,0	0,05	375	±25	Sand upper
9	3	45,0	±5		20,0	0,05	450	±50	Sand upper
10	3	20,0	±5		21,0	0,05	525	±50	Sand upper
12	5	30,0	±5		21,0	0,05	525	±50	Soil PI=15
Profondità vincolata pseudobedrock: -145÷185 m							575	±50	

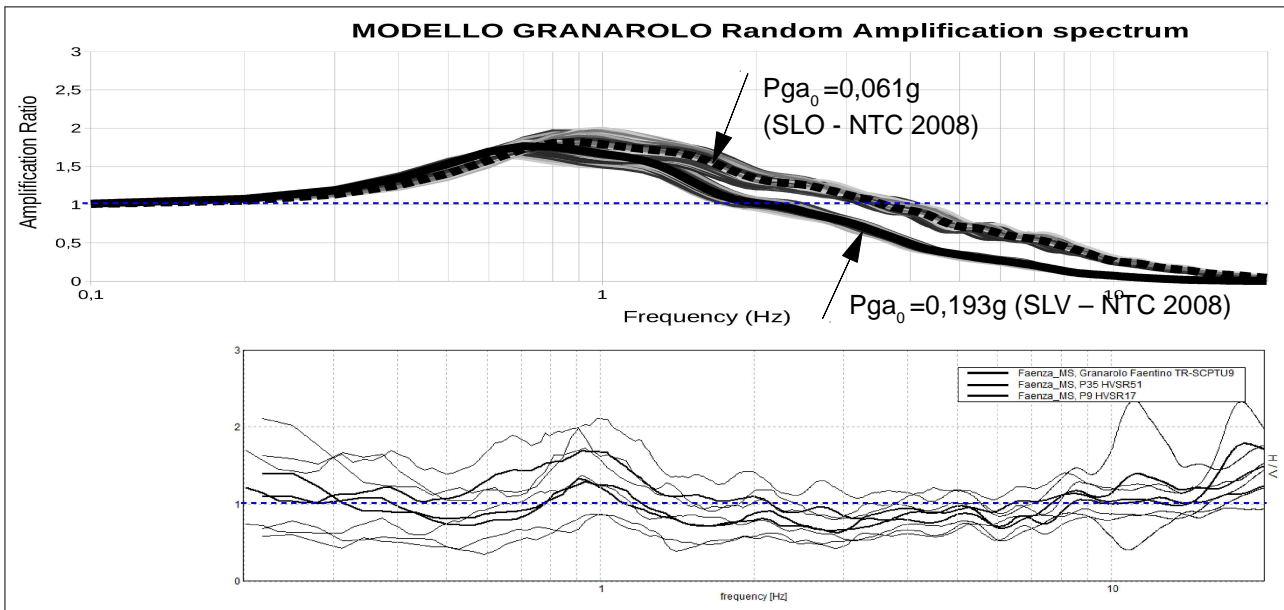
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO:



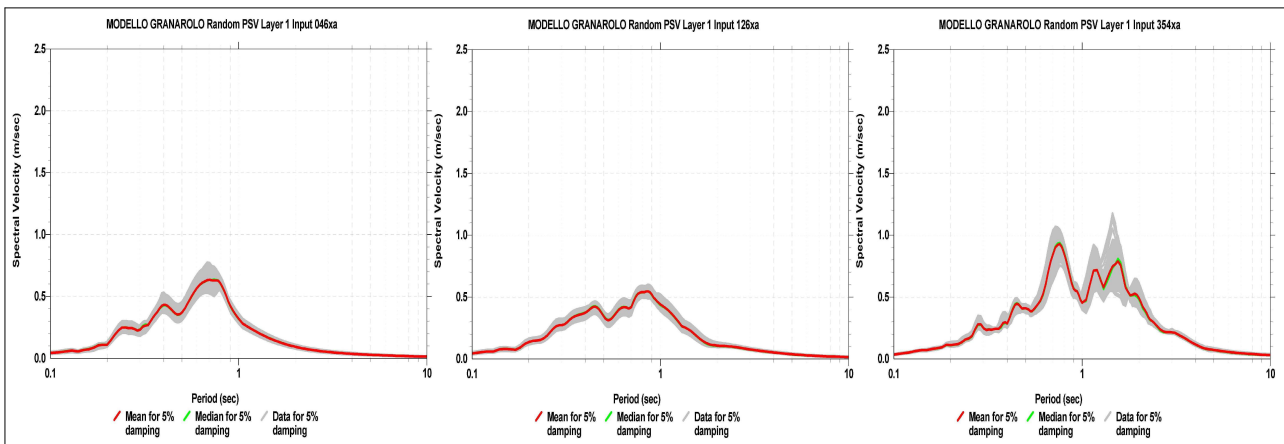
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (VALORI DI MEDIANA) VALORI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:



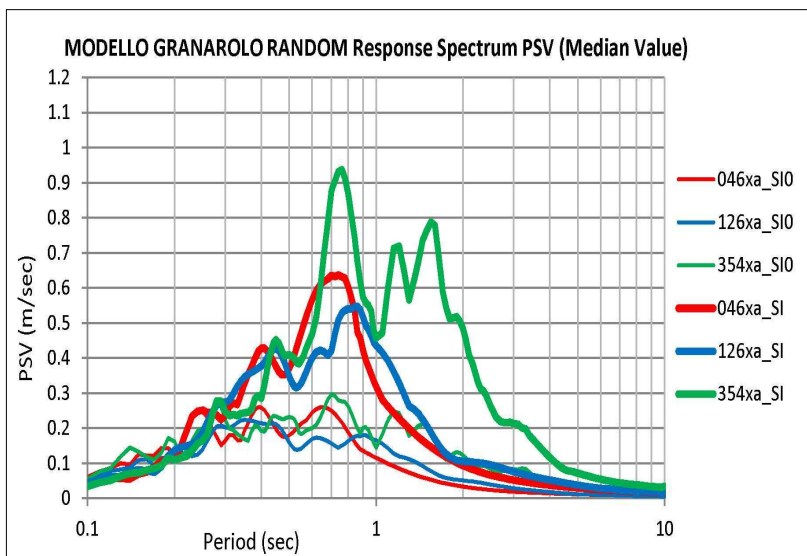
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI RSL (RICAVATE CON DIFFERENTI LIVELLI ENERGETICI DI SCUOTIMENTO SISMICO) E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DALLE REGISTRAZIONI TROMOGRAFICHE AL SUOLO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT SISIICI DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUODOBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):



VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:

DAL 112/2007	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0
1-Input_046xa	1.4	2.7
2-Input_046xa	1.5	2.8
3-Input_354xa	1.3	3.0
<b>MEAN</b>	<b>1.4</b>	<b>2.8</b>



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

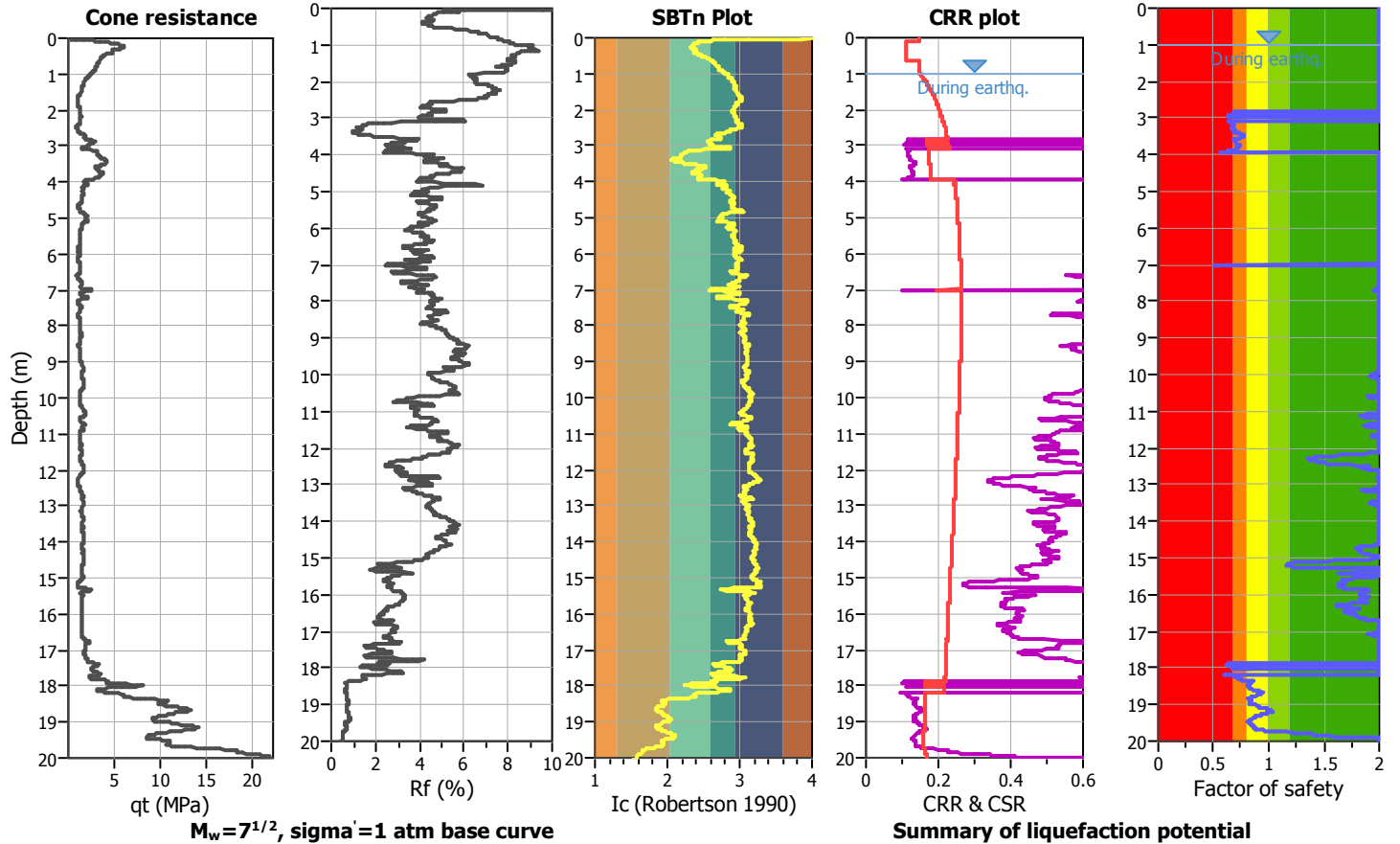
**Project title :**

**Location :**

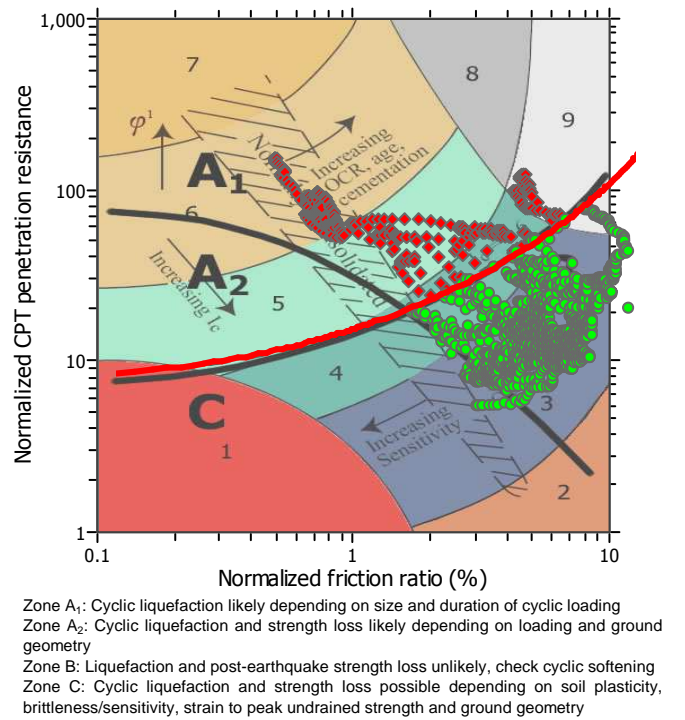
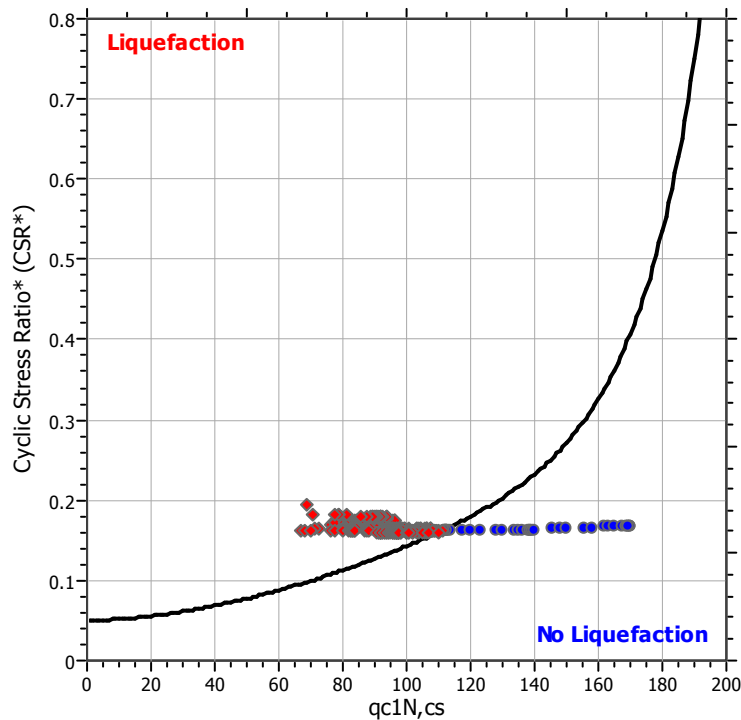
**CPT file : P1CPTU1**

**Input parameters and analysis data**

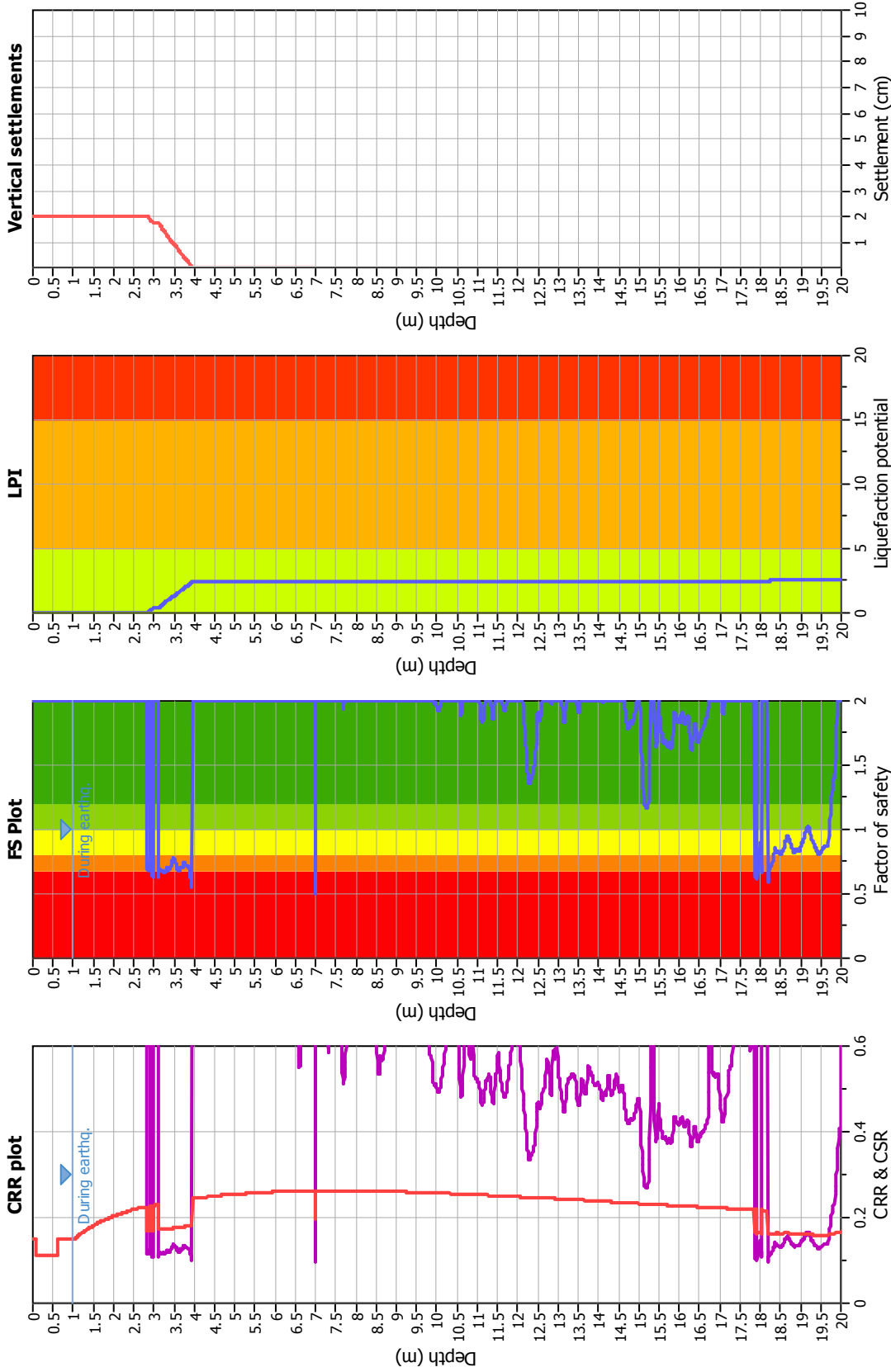
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.27	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 2.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

## F. S. color scheme

Almost certain it will liquefy  
 Very likely to liquefy  
 Liquefaction and no liq. are equally likely  
 Unlike to liquefy  
 Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

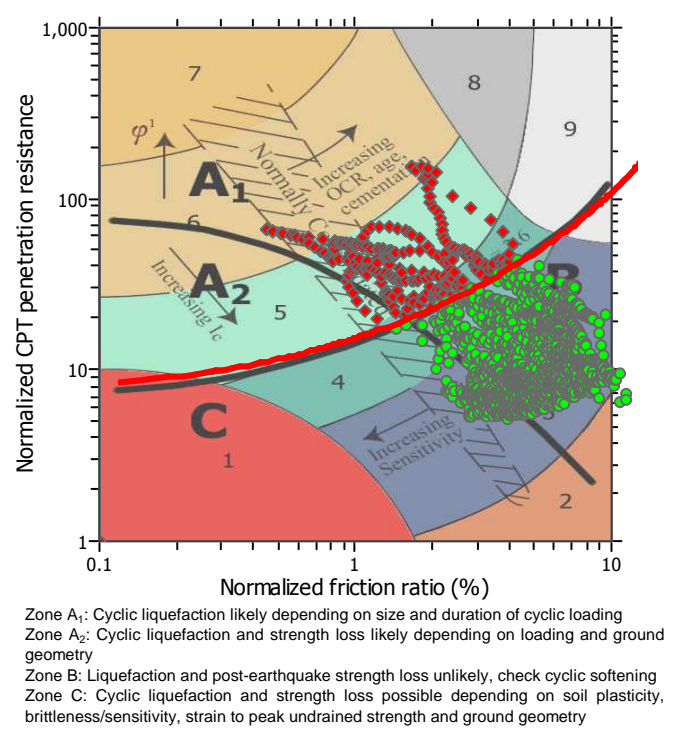
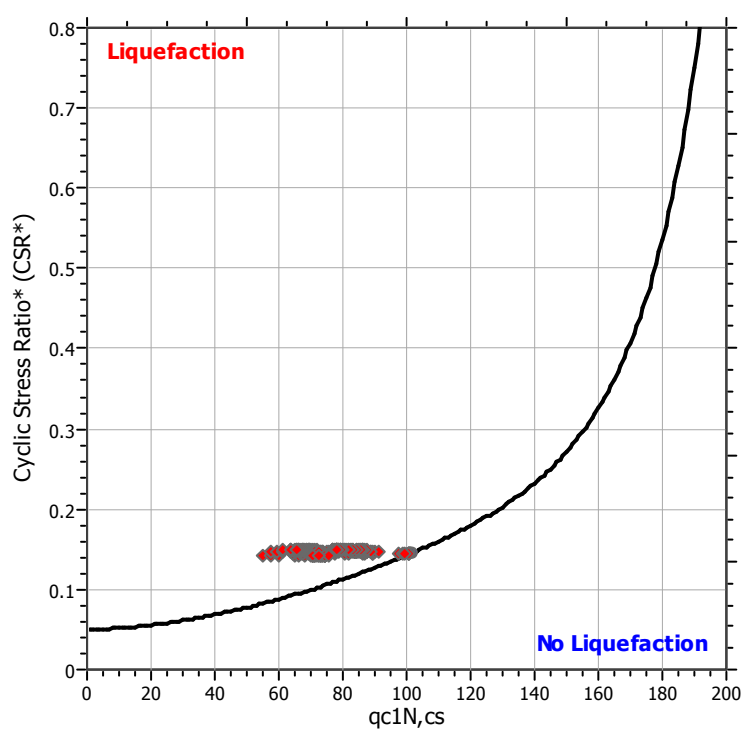
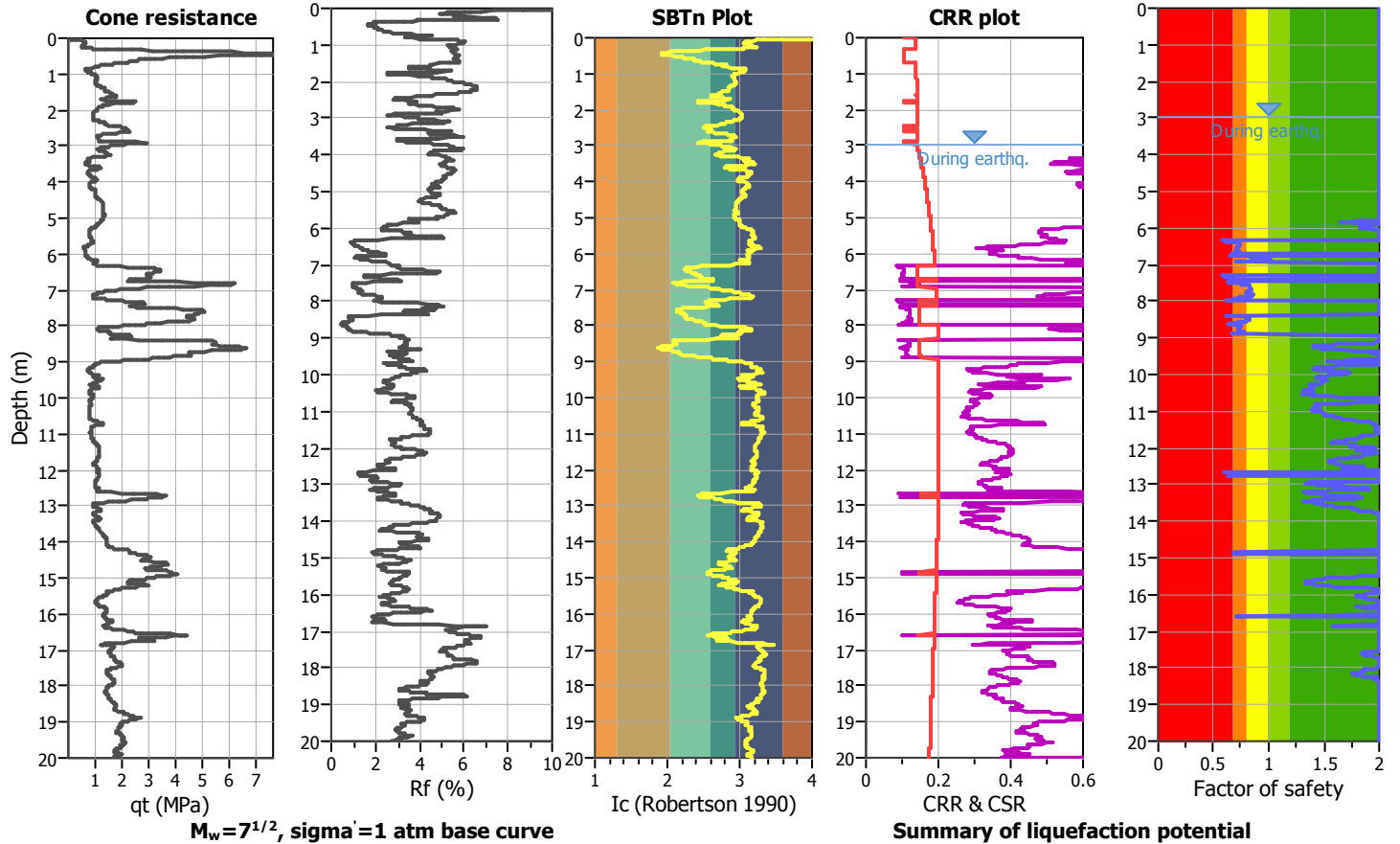
**Project title :**

**Location :**

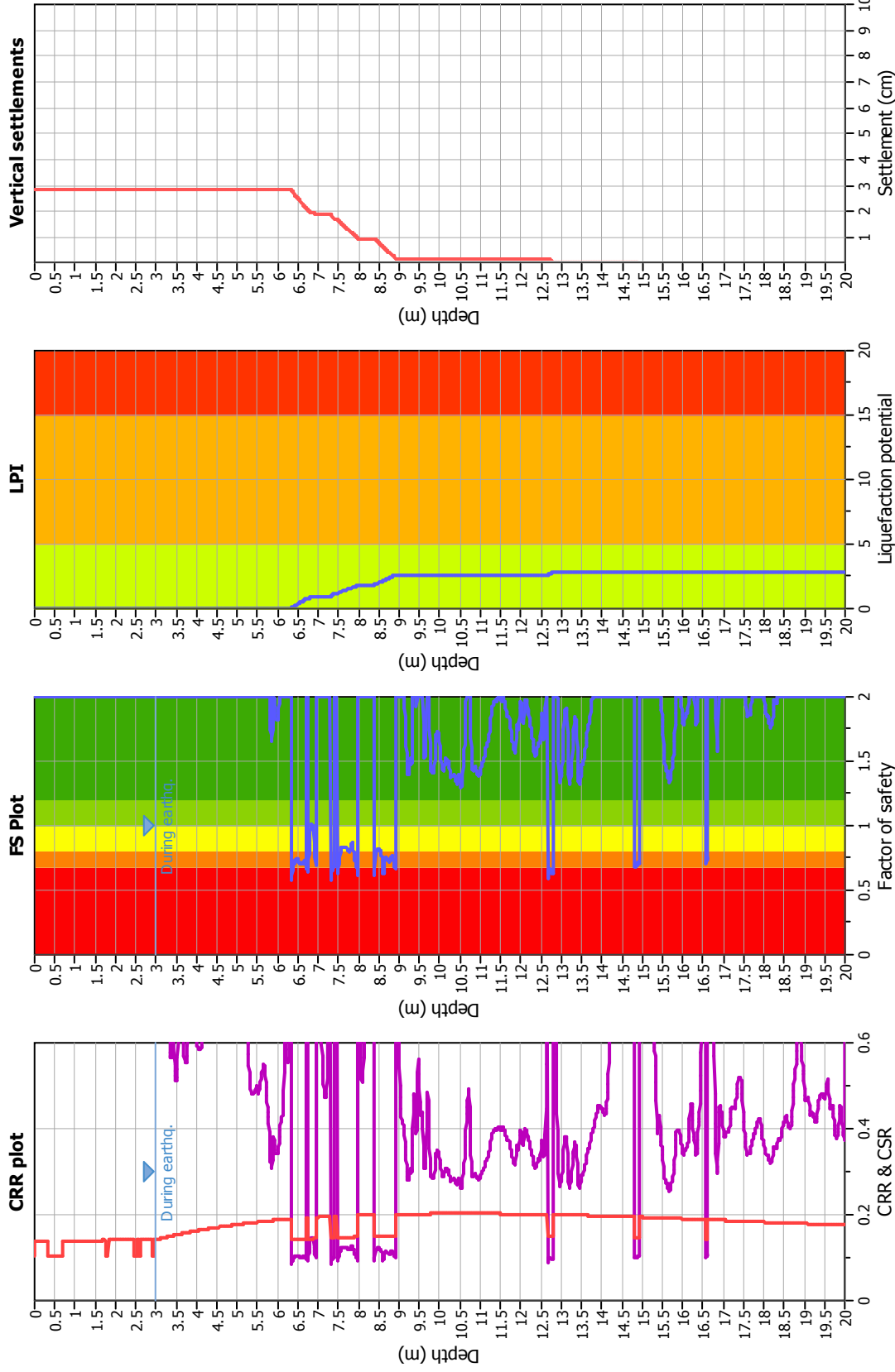
**CPT file : P2CPTU2**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	3.20 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	3.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.25	$\sigma_v$ :	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.25  
 Depth to water table (insitu): 3.20 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect: applied: No  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 3.00 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

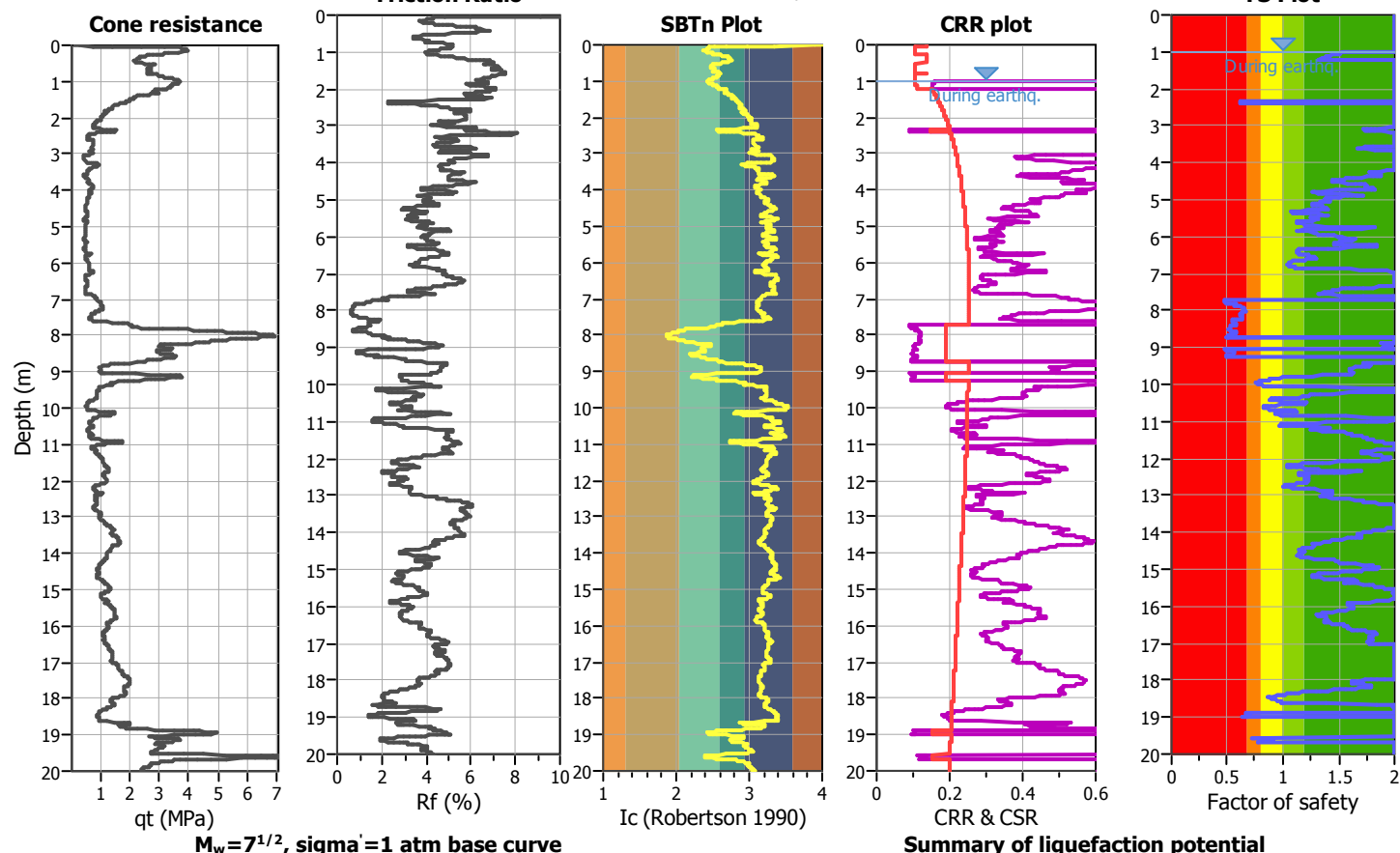
**Project title :**

**Location :**

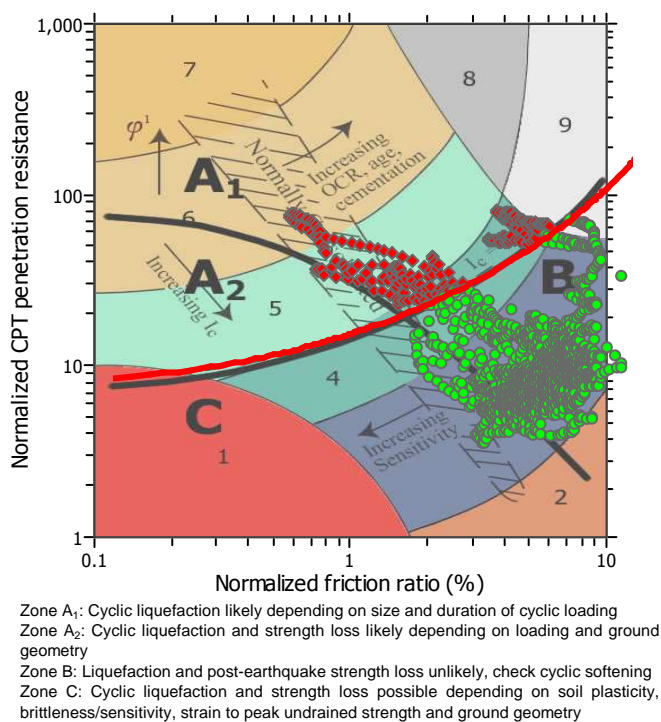
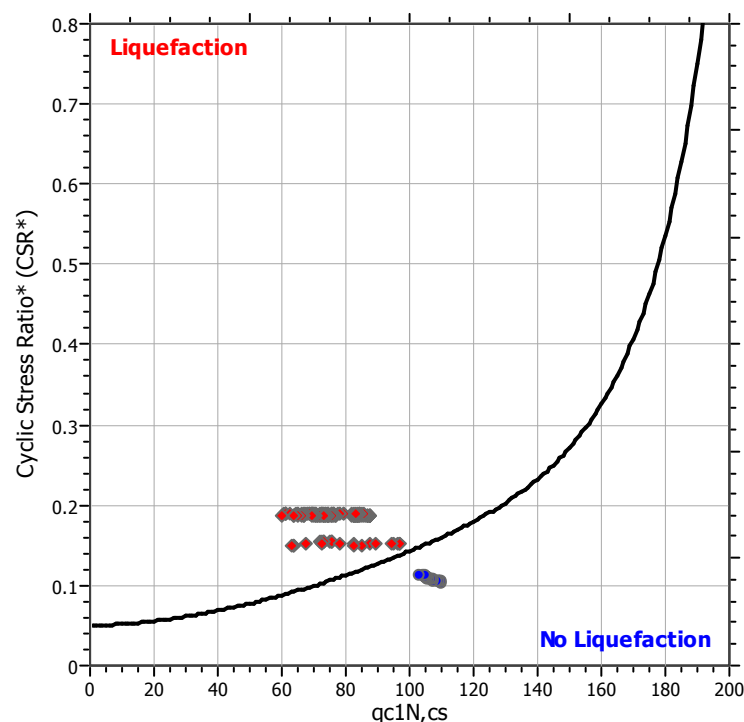
**CPT file : P3CPTU3**

**Input parameters and analysis data**

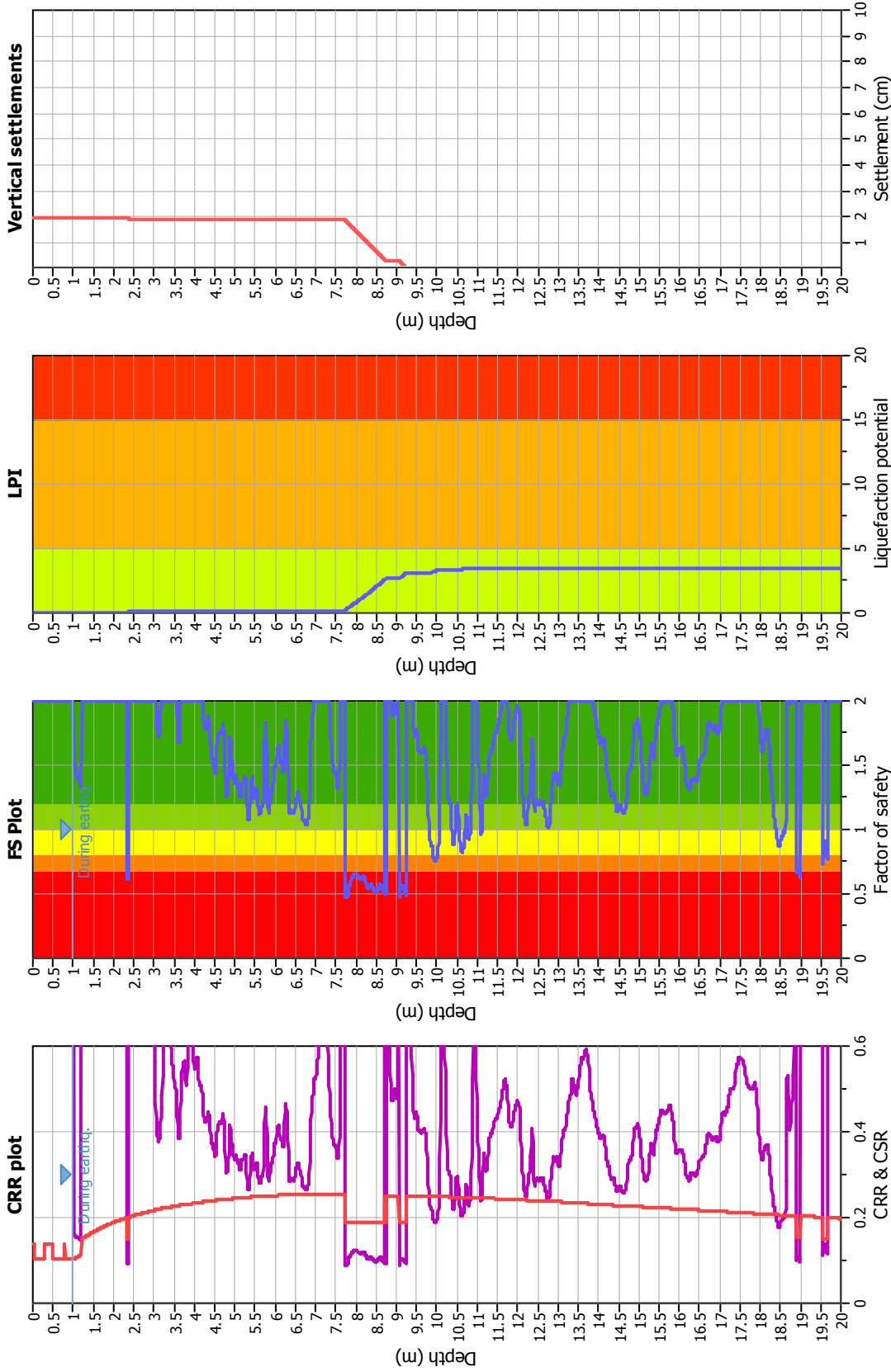
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.20 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.25	$\gamma_n$ :	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve



## Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.25  
 Depth to water table (insitu): 2.20 m

### F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

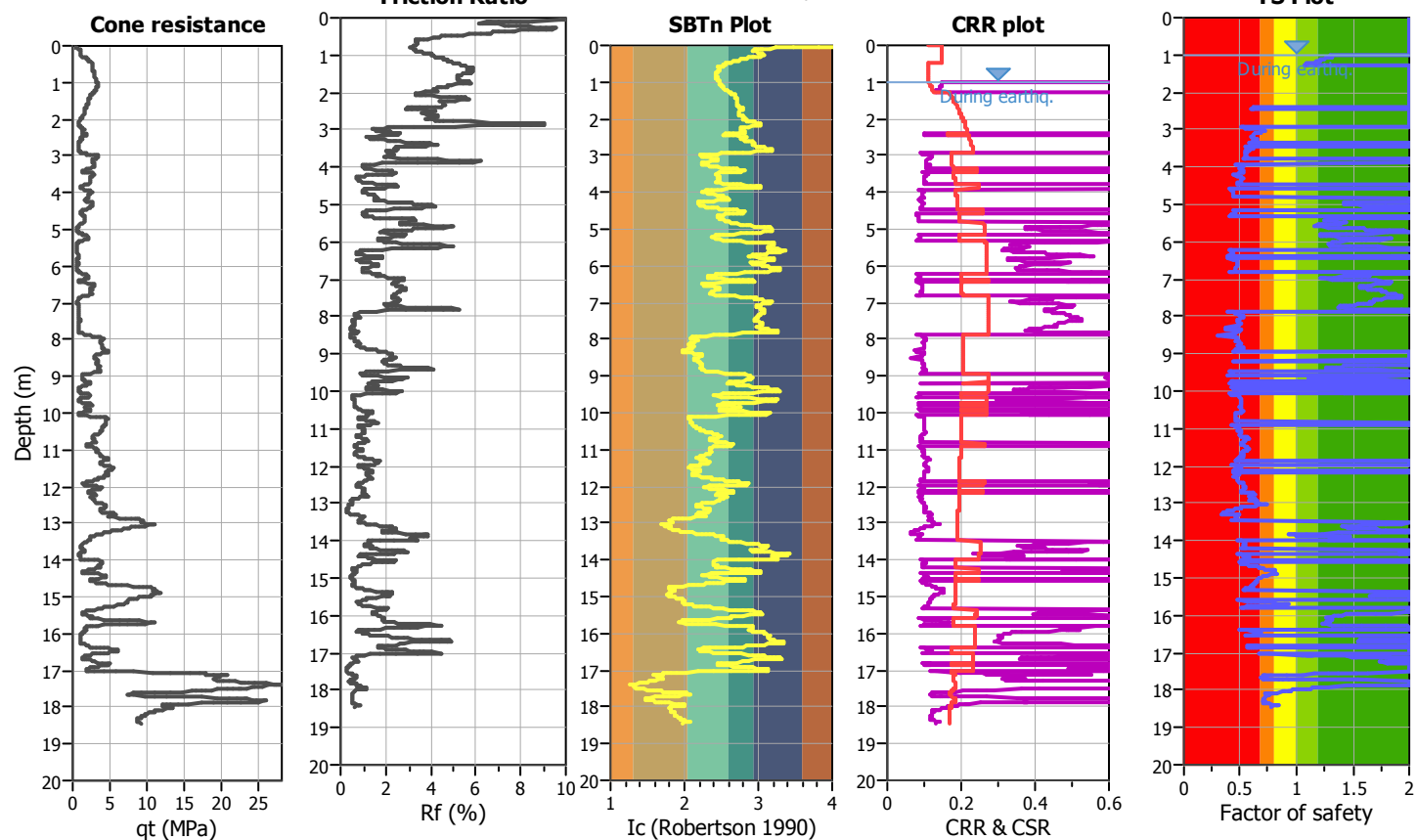
**Project title :**

**Location :**

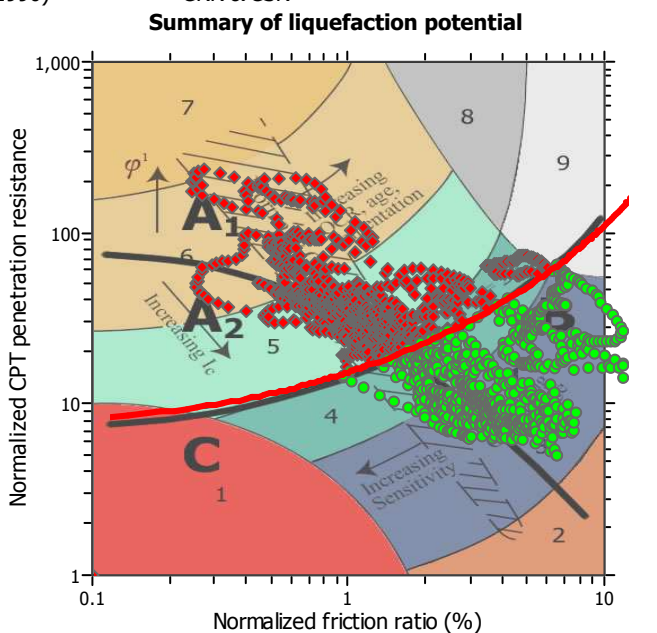
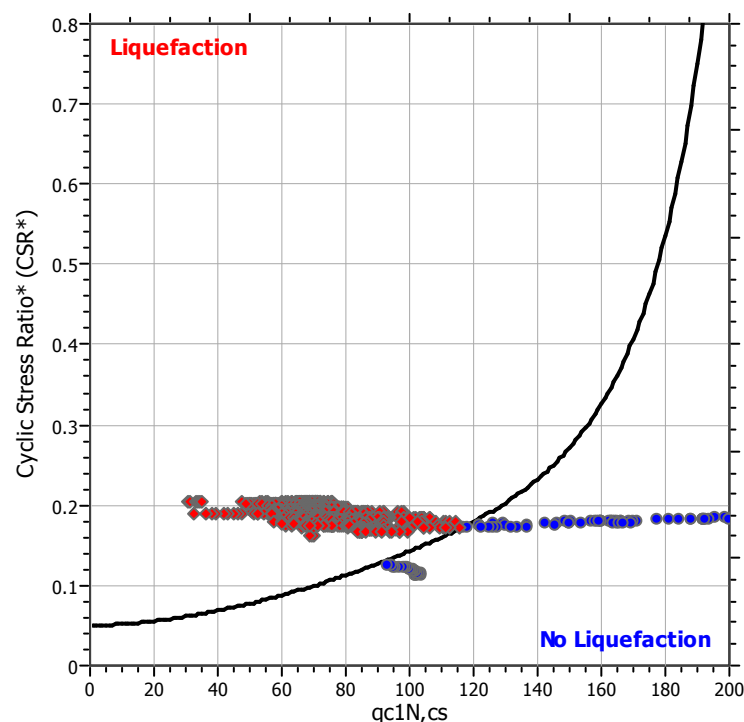
**CPT file : P4CPTU5**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.27	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		

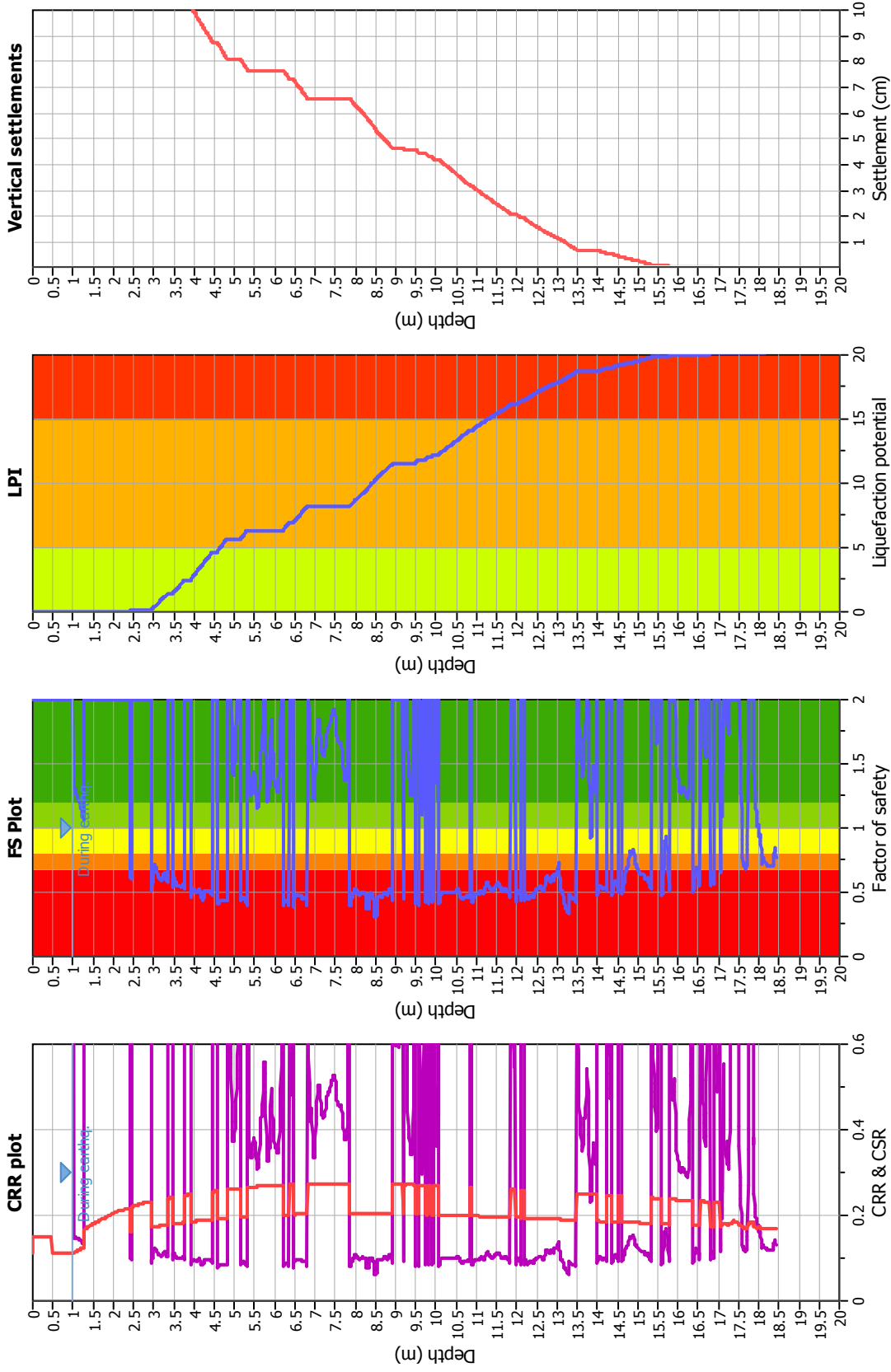


$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

## Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 2.30 m

### F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlike to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

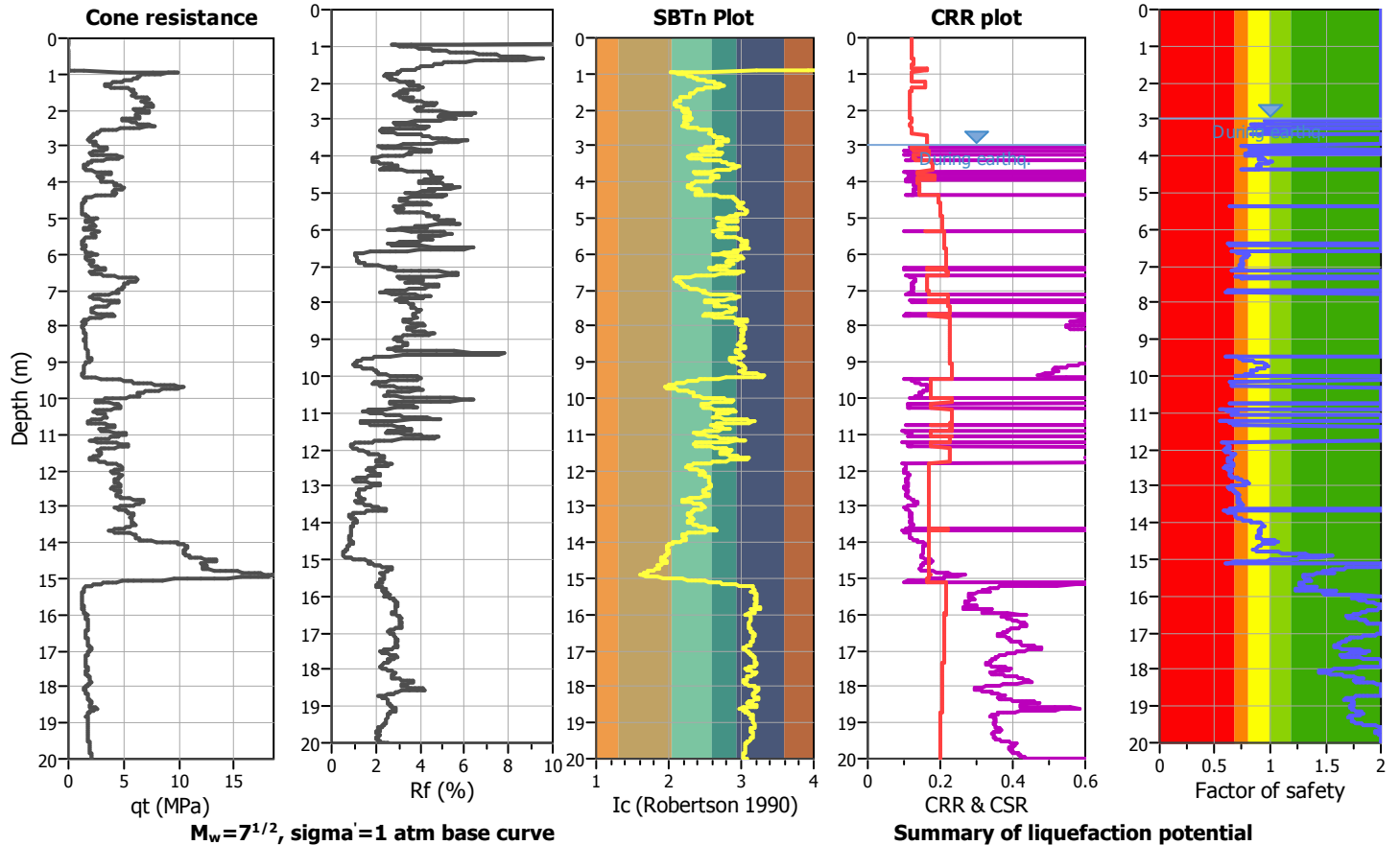
**Project title :**

**Location :**

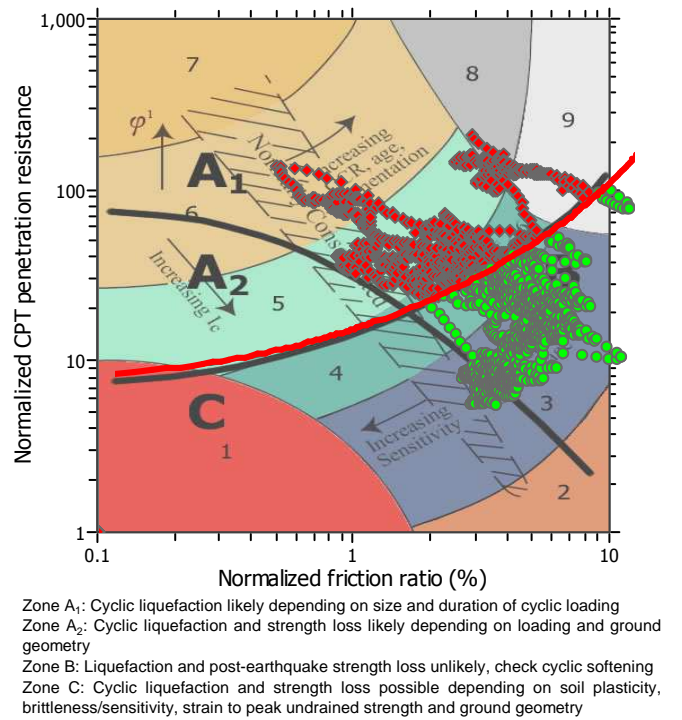
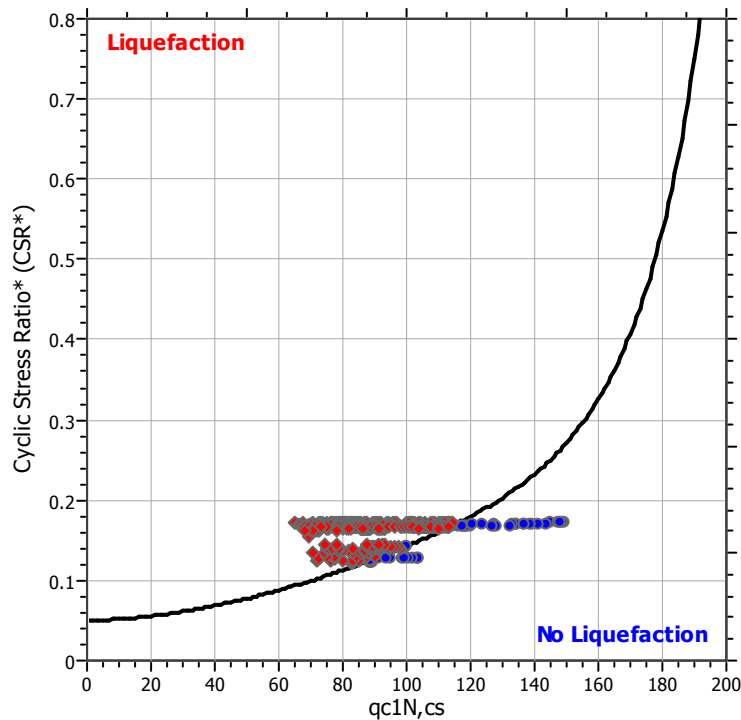
**CPT file : P5CPTU6**

**Input parameters and analysis data**

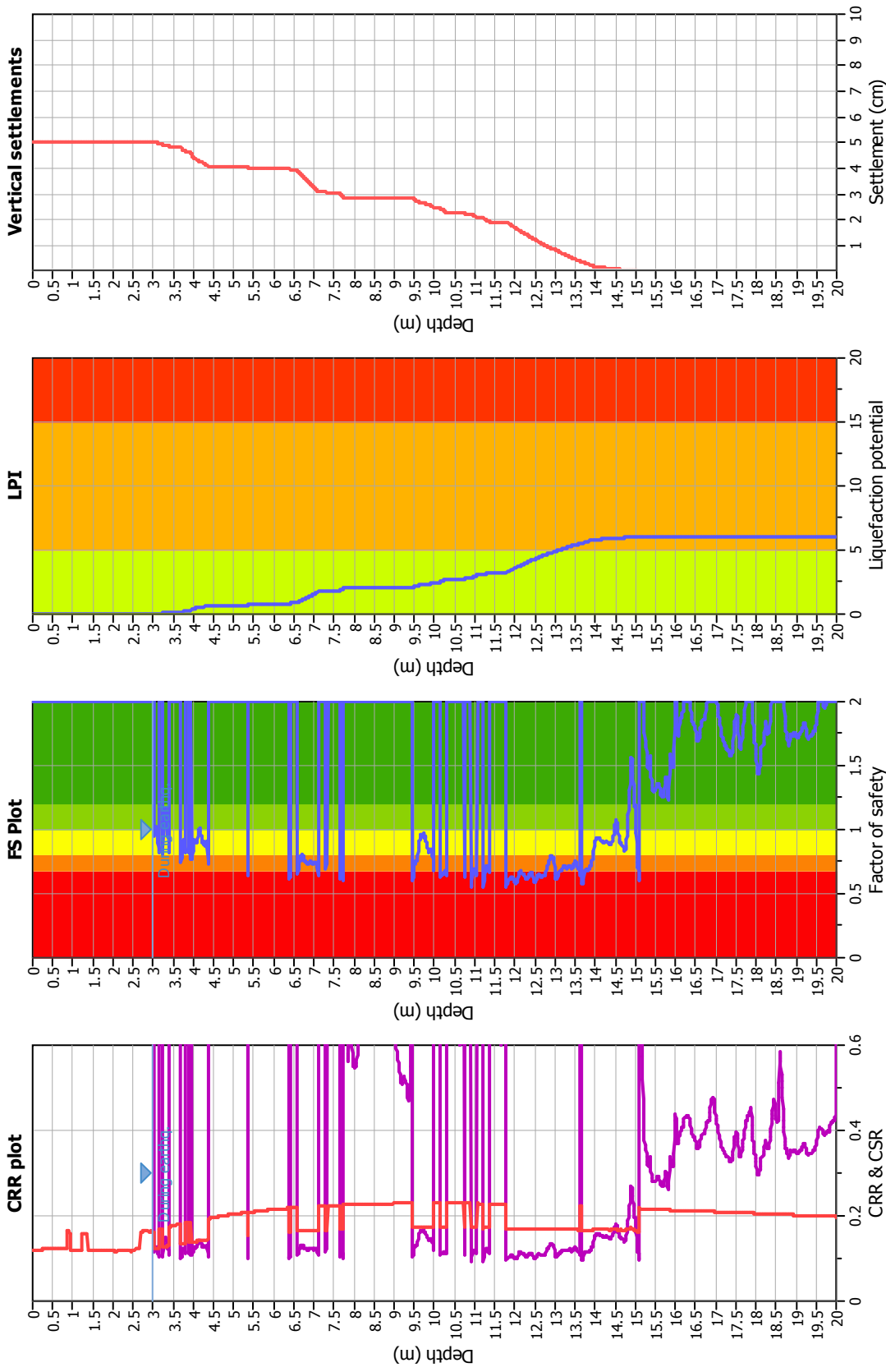
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	4.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	3.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.29	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.29  
 Depth to water table (insitu): 4.00 m

## Fill weight:

Depth to GWT (earthq.): 3.00 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

## Transition detect. applied:

N/A  
 No  
 Yes  
 Sand & Clay  
 Yes  
 20.00 m

## F. S. color scheme

Almost certain it will liquefy  
 Very likely to liquefy  
 Liquefaction and no liq. are equally likely  
 Unlike to liquefy  
 Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

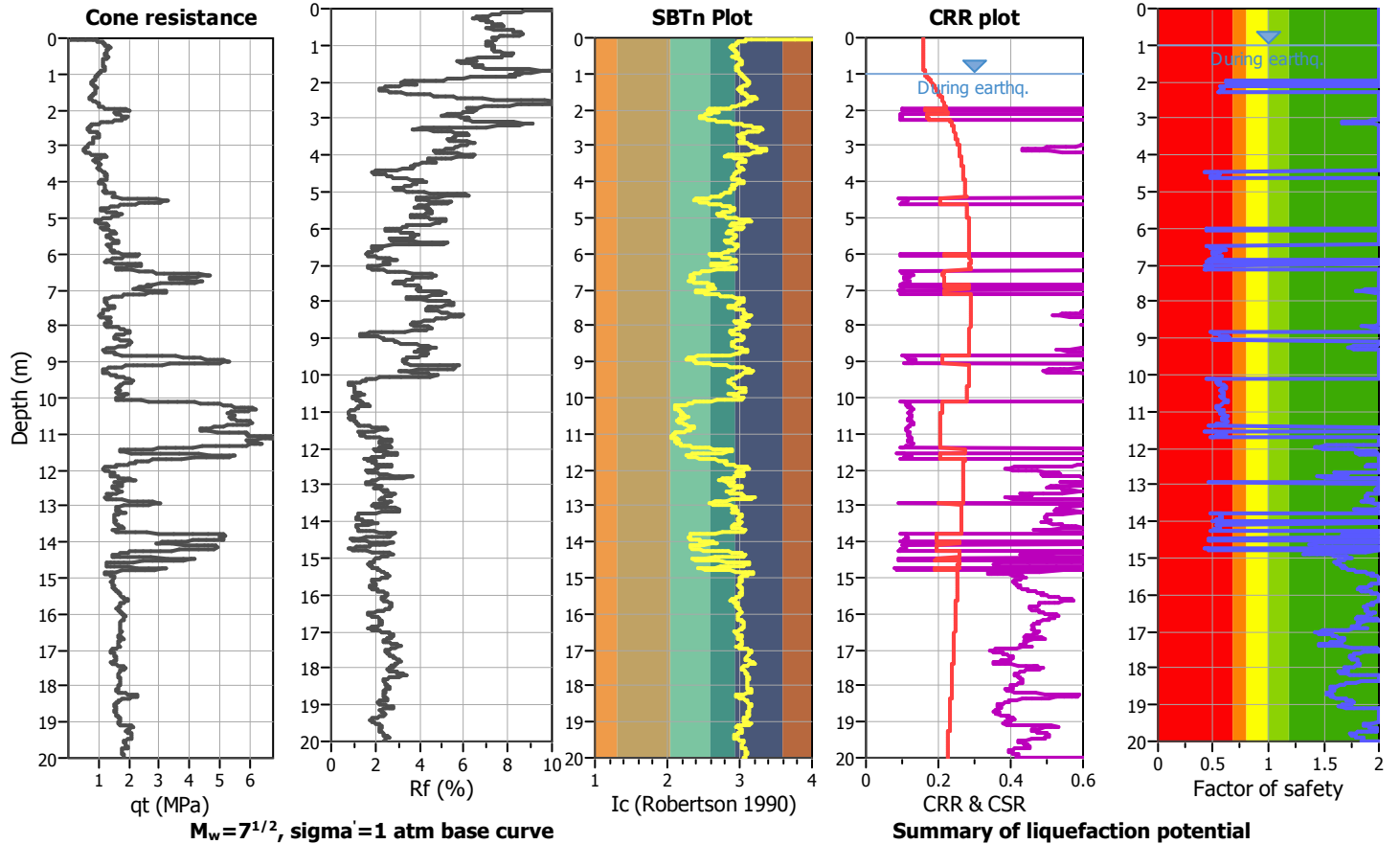
**Project title :**

**Location :**

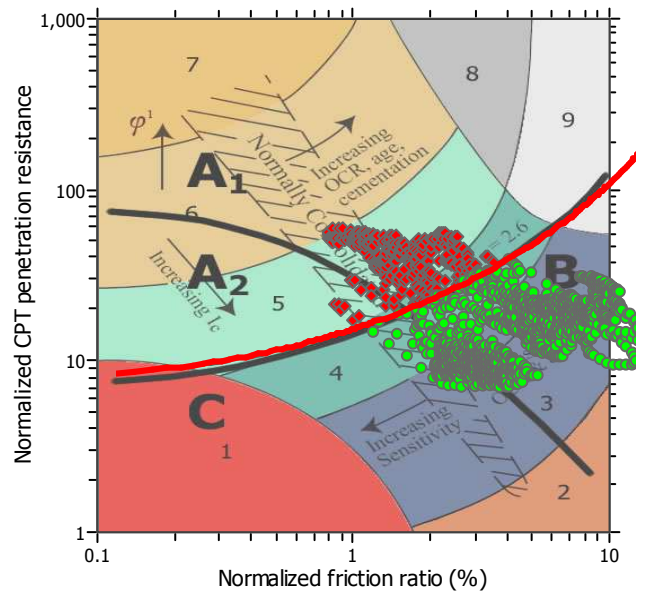
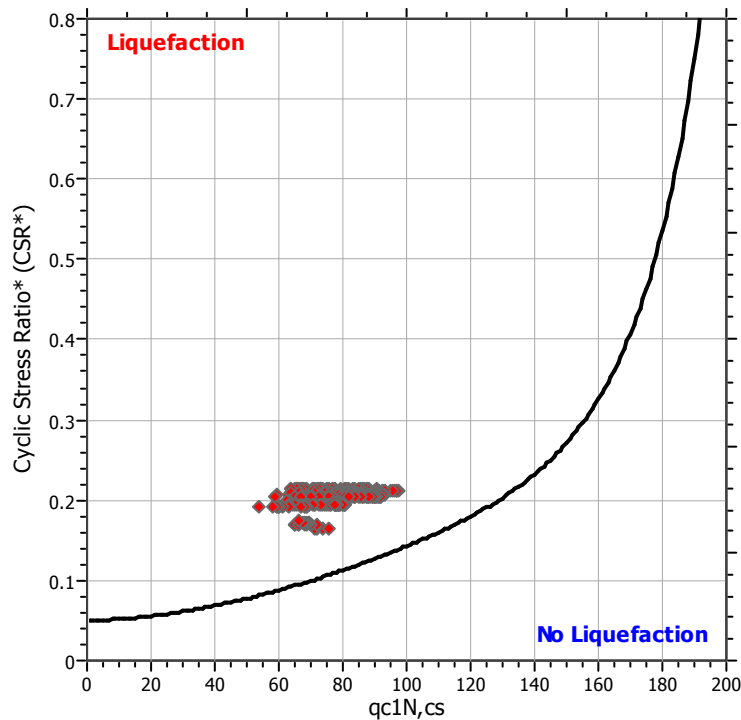
**CPT file : P6CPTU8**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.70 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.29	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		

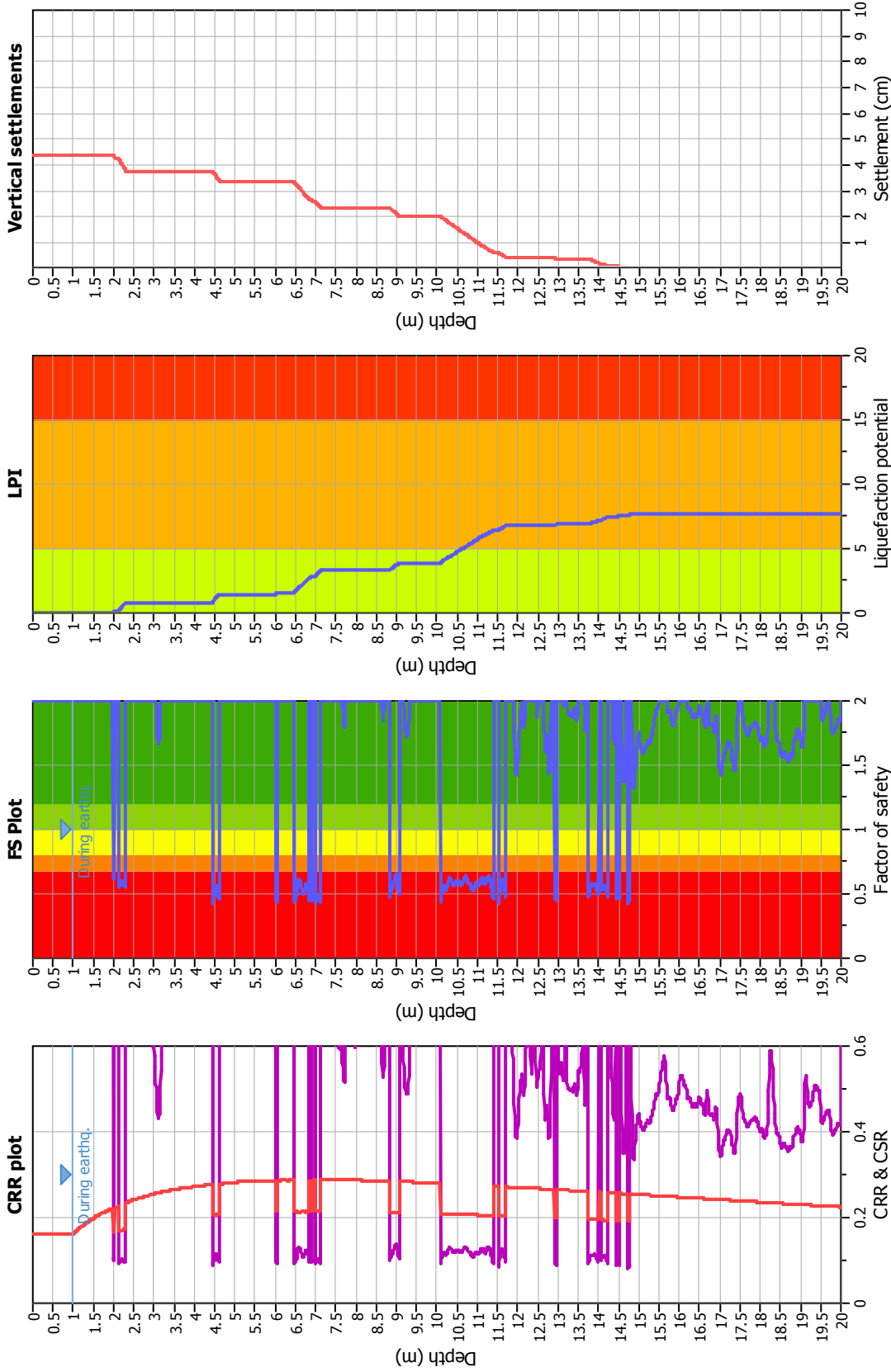


$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

## Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.29  
 Depth to water table (insitu): 2.70 m

### F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect: applied: No  
 K<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

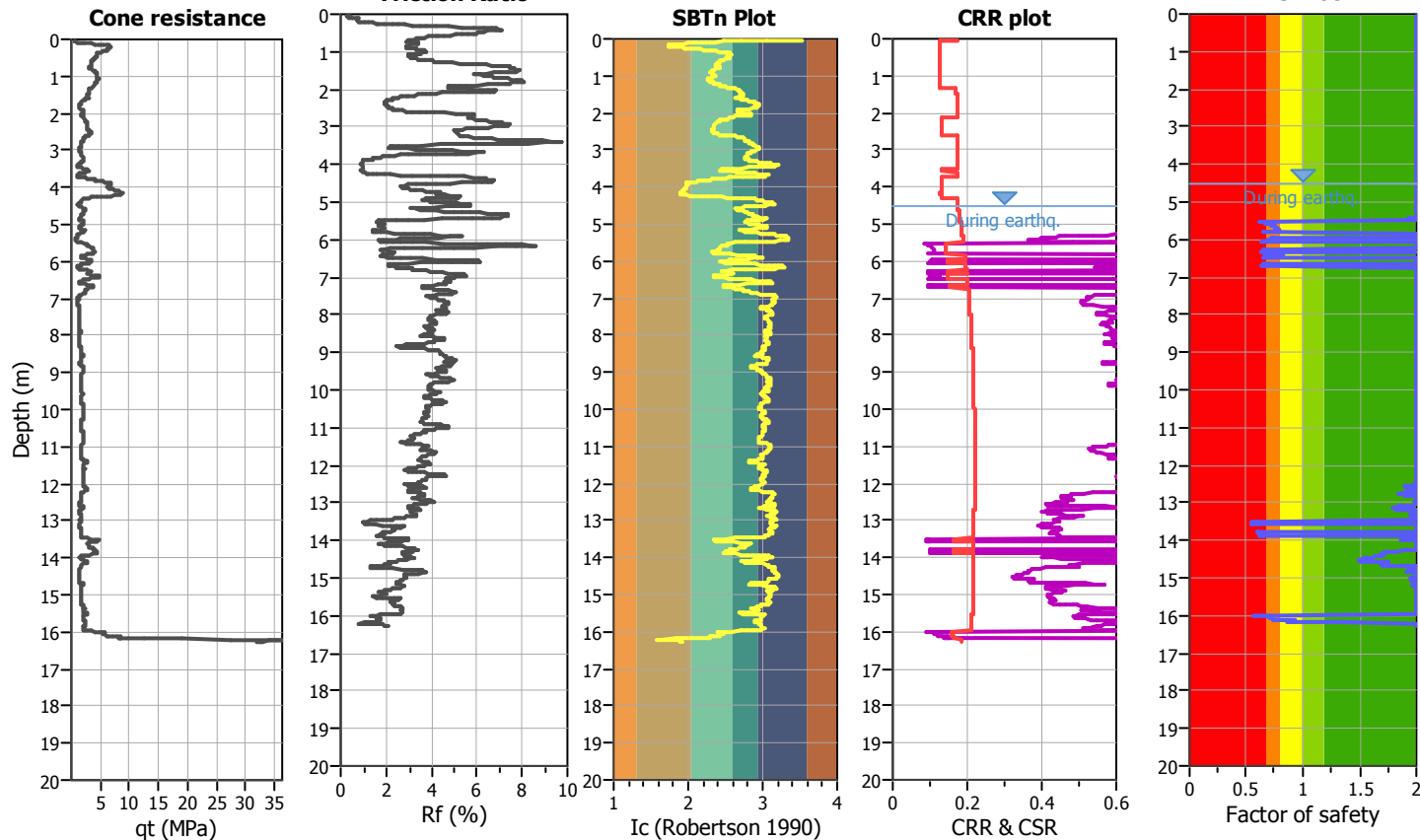
**Project title :**

**Location :**

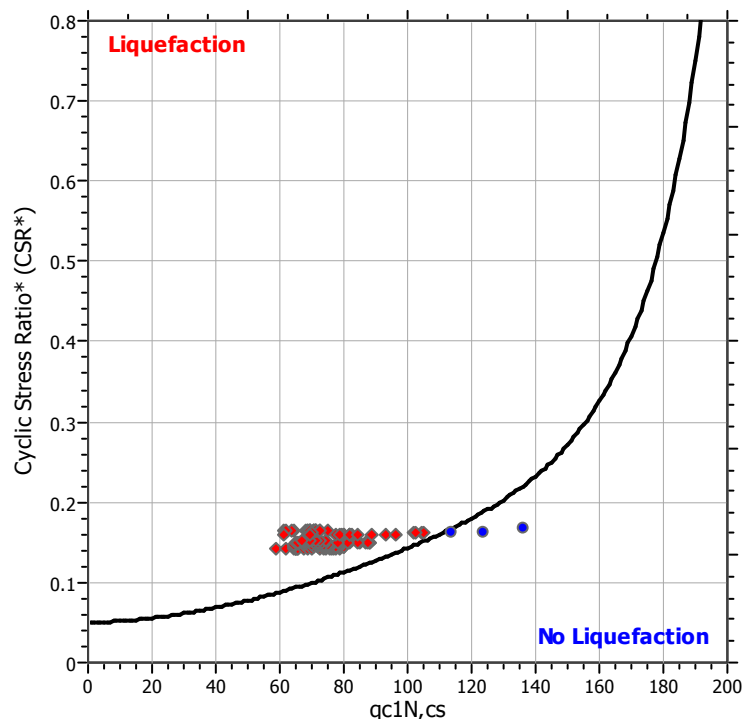
**CPT file : P7CPTU11**

**Input parameters and analysis data**

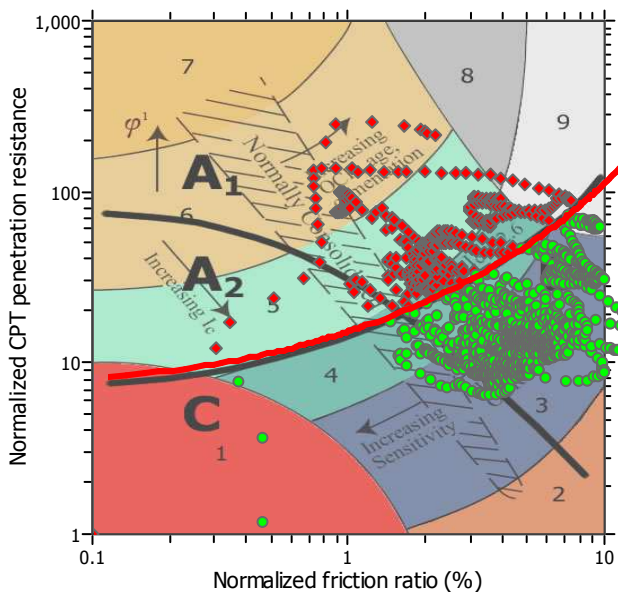
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	4.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	4.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSI	
Peak ground acceleration:	0.31	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve

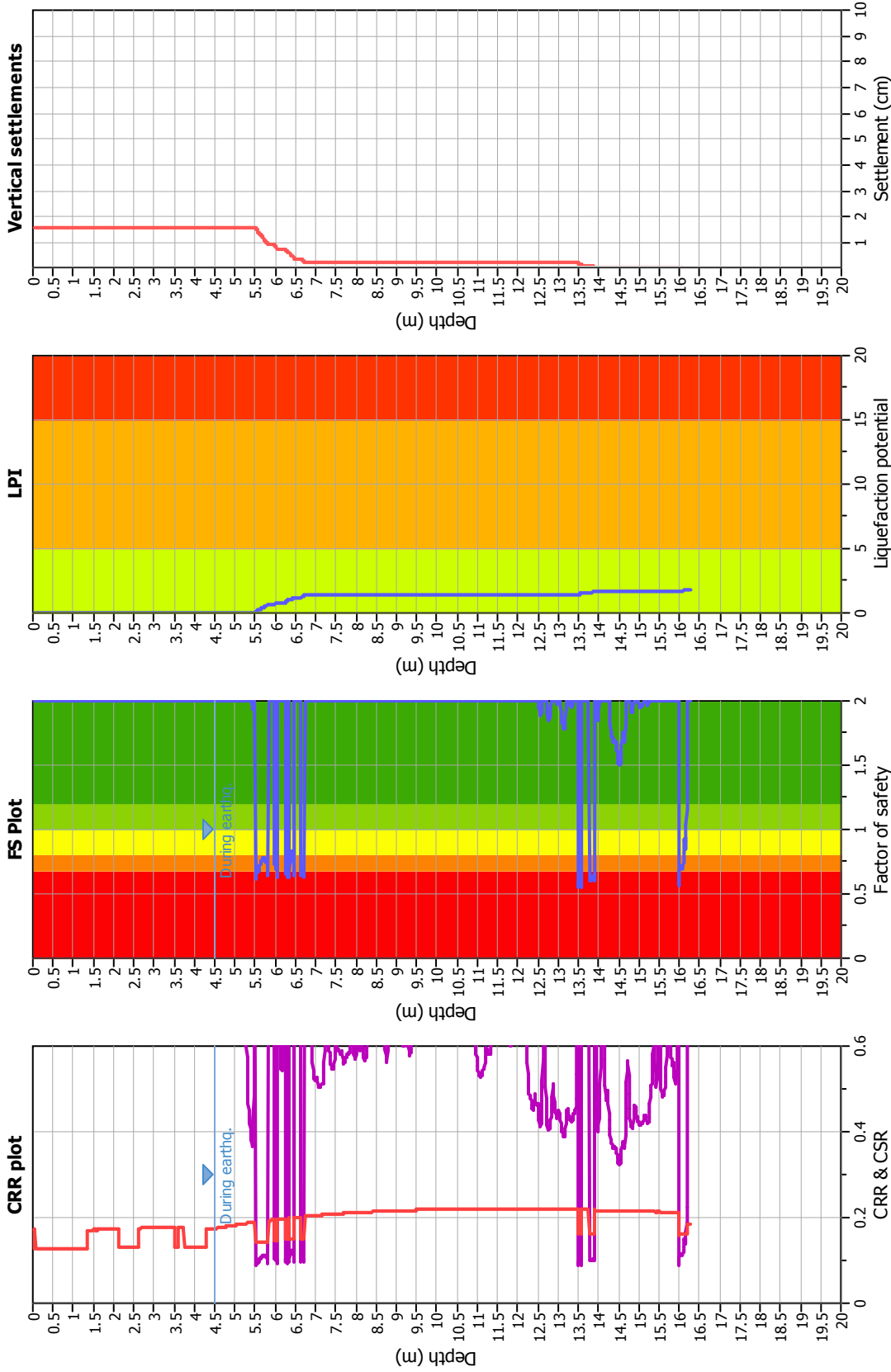


**Summary of liquefaction potential**



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on  $I_c$  value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.31  
 Depth to water table (insitu): 4.50 m

Depth to GWT (earthq.): 4.50 m  
 Average results interval: 3  
 $I_c$  cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

## F.S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

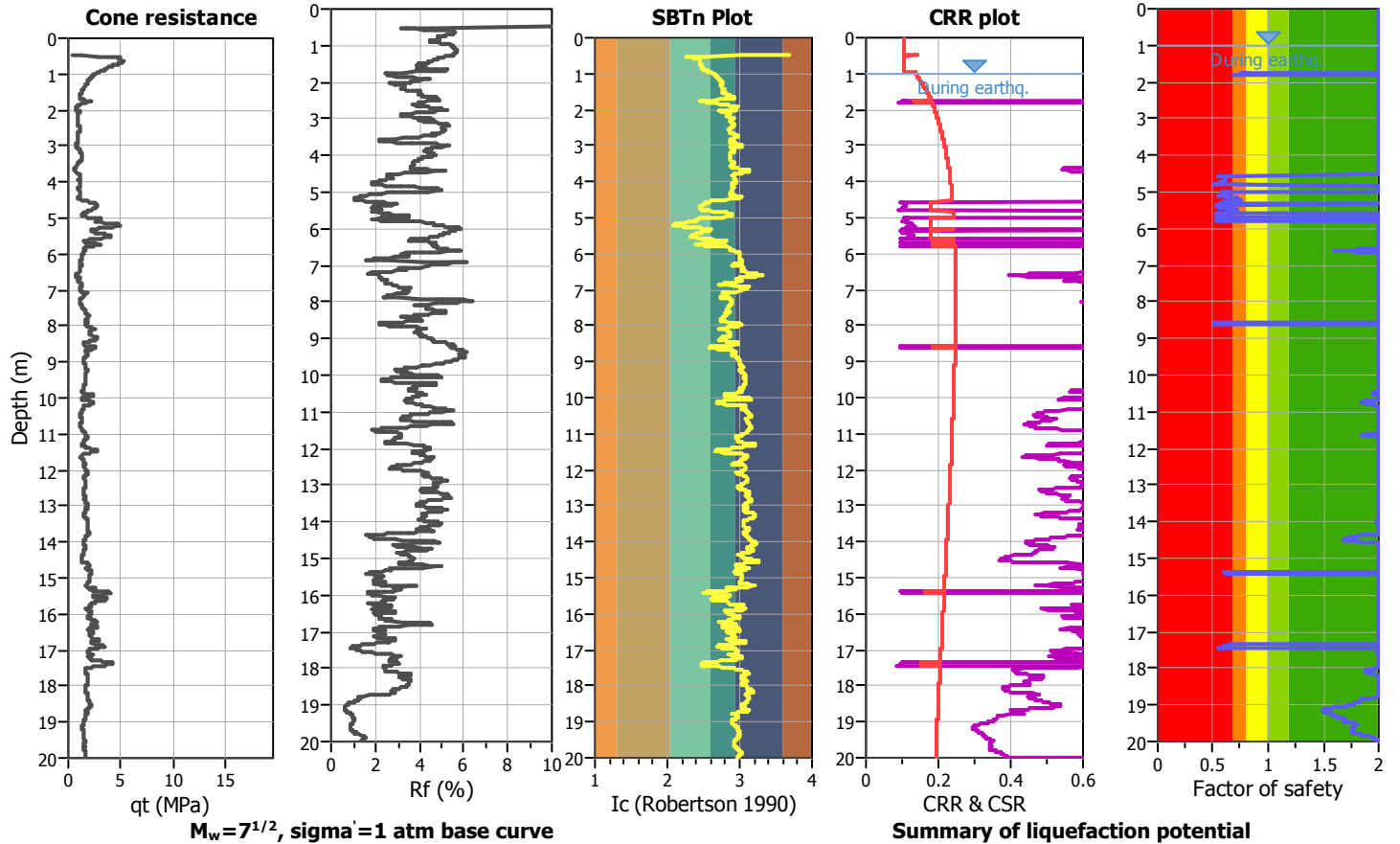
**Project title :**

**Location :**

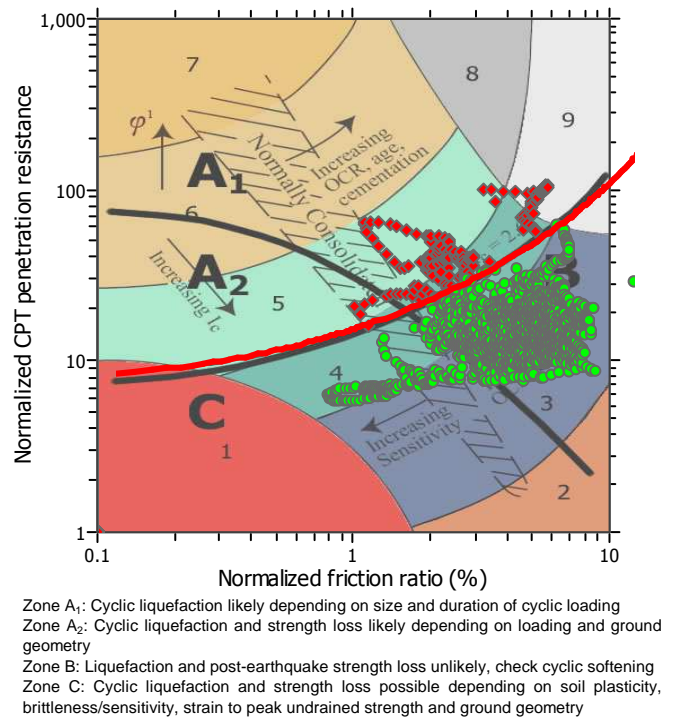
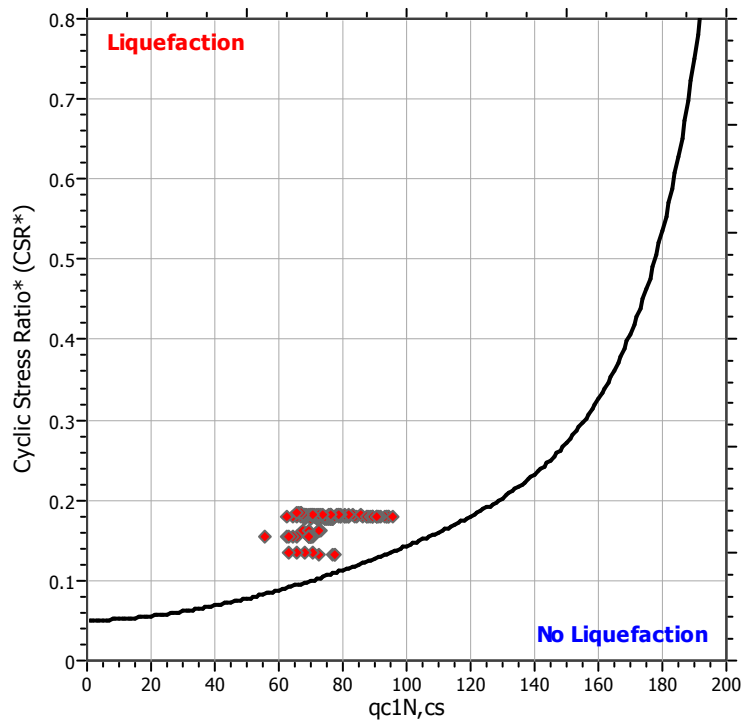
**CPT file : P8CPTU12**

**Input parameters and analysis data**

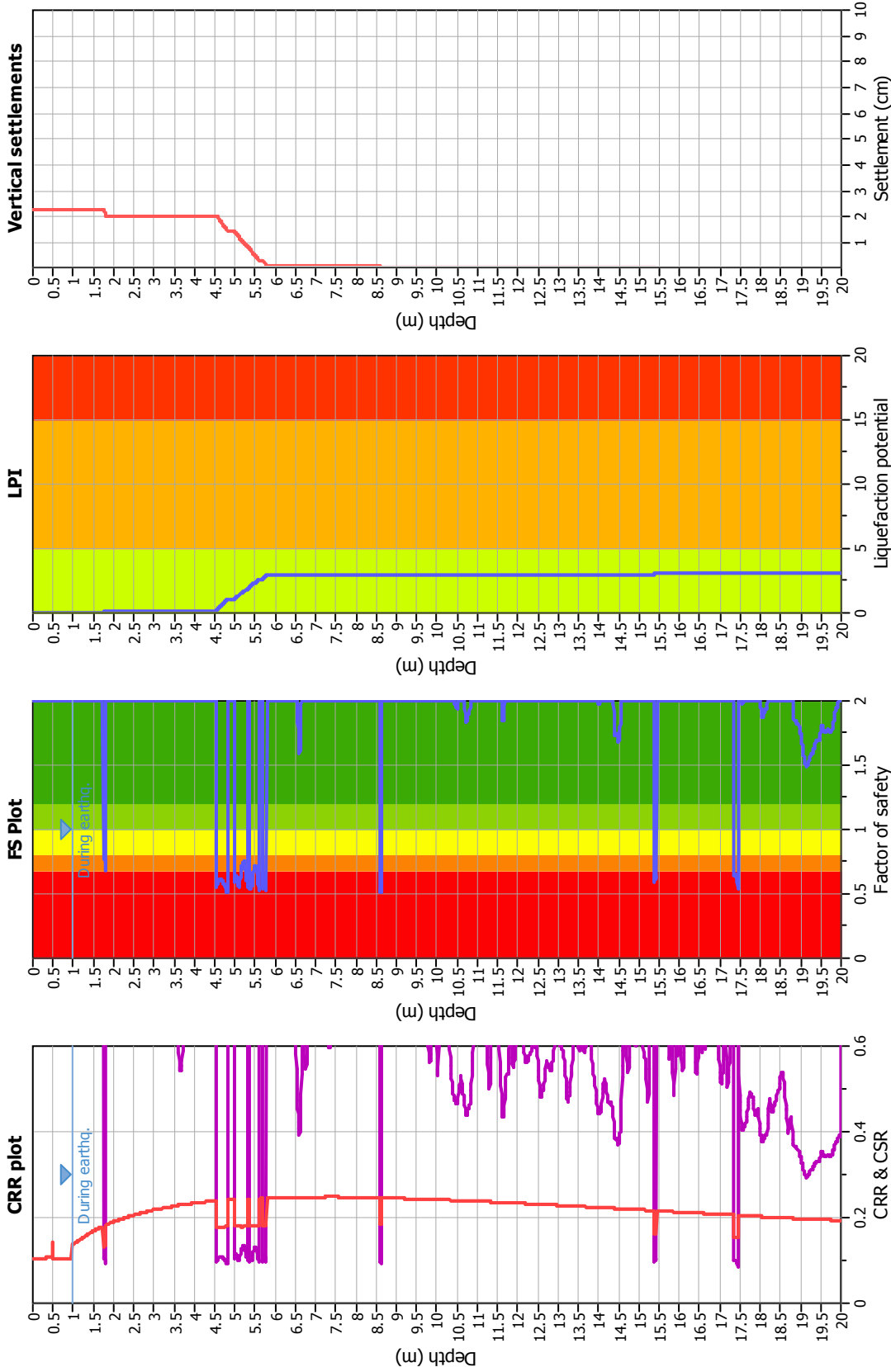
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.25	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m
Fines correction method:	R&W (1998)	Average results interval:	3
Points to test:	Based on I <sub>c</sub> value	I <sub>c</sub> cut-off value:	2.60
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No
Depth to water table (insitu):	2.30 m	Fill height:	N/A
		Fill weight:	N/A
		Transition detect. applied:	No
		K <sub>σ</sub> applied:	Yes
		Clay like behavior applied:	Sand & Clay
		Limit depth applied:	Yes
		Limit depth:	20.00 m



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

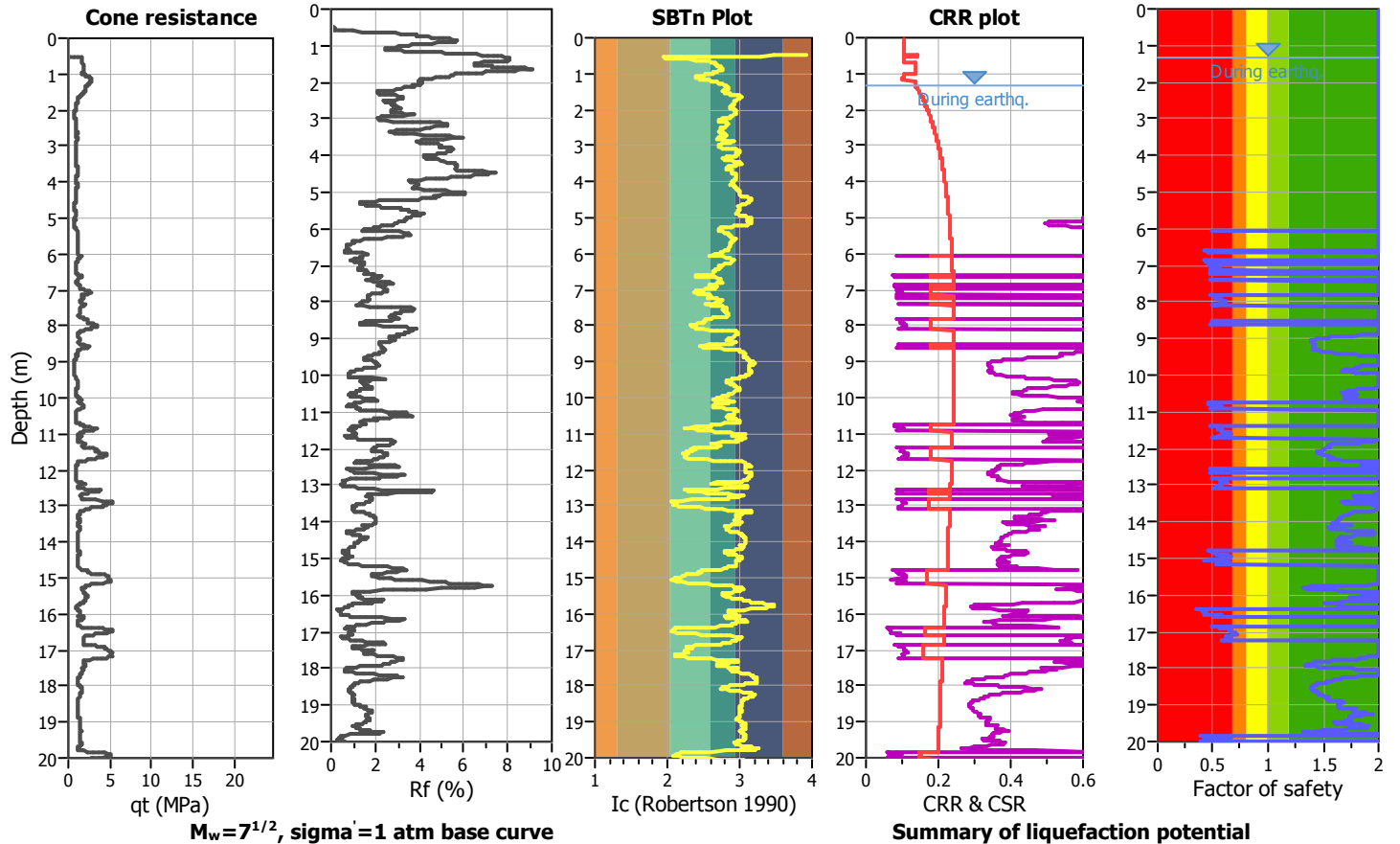
**Project title :**

**Location :**

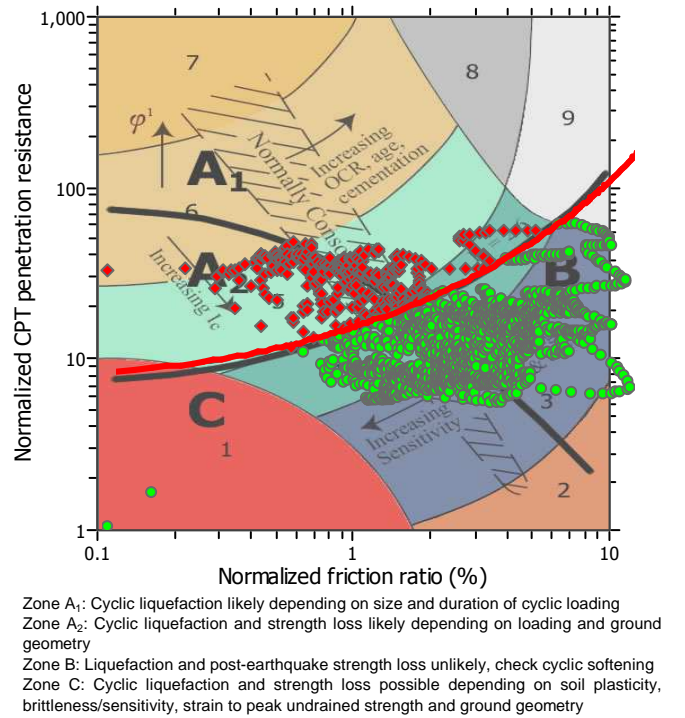
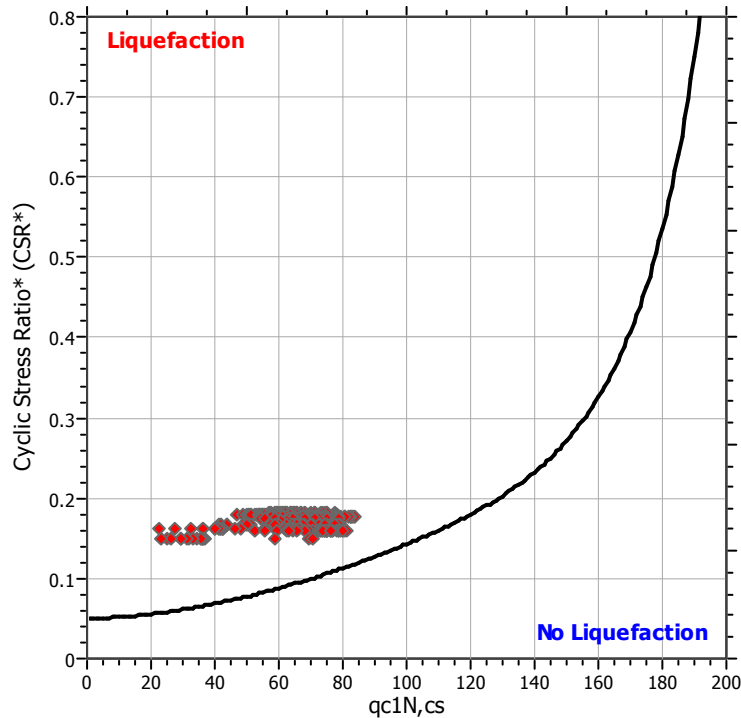
**CPT file : P9CPTU15**

**Input parameters and analysis data**

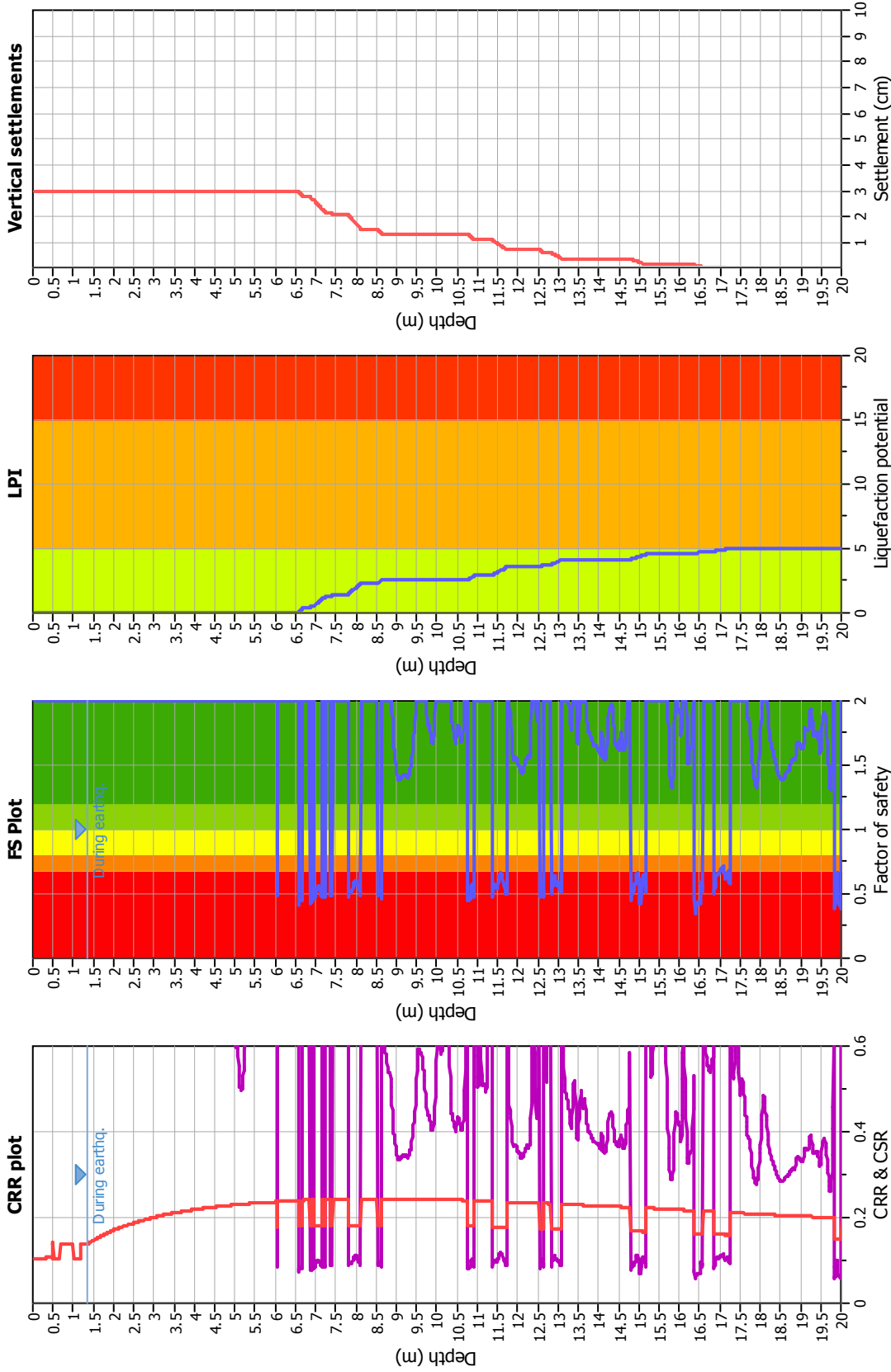
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.90 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.35 m	Fill height:	N/A	applied:	Sand & Clay
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.25	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes	MSF	



$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.25  
 Depth to water table (insitu): 1.90 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.35 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

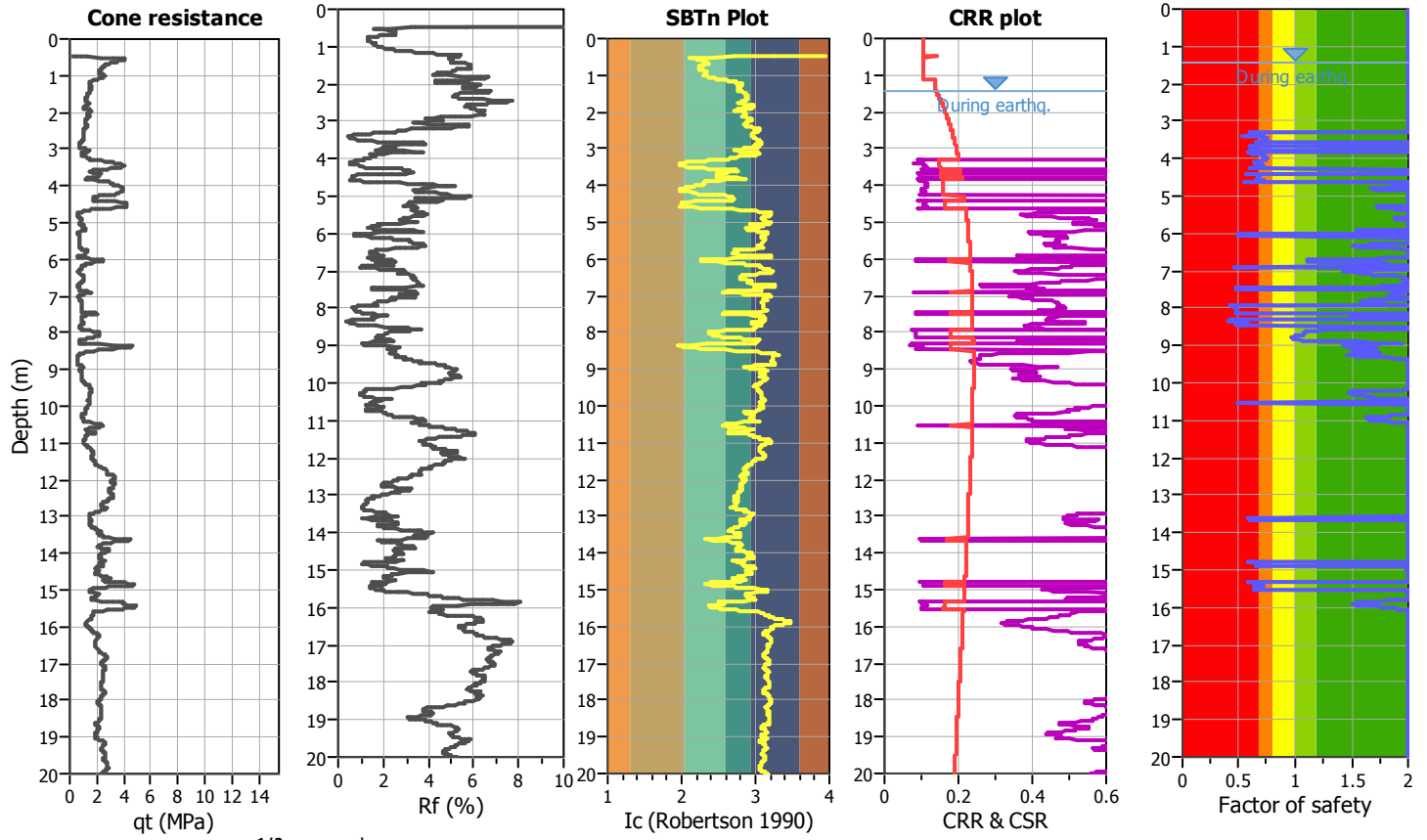
**Project title :**

**Location :**

**CPT file : P10CPTU18**

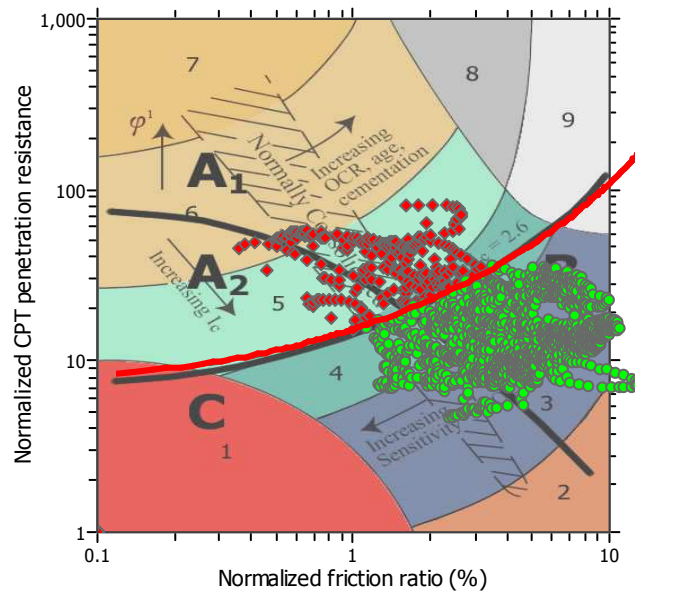
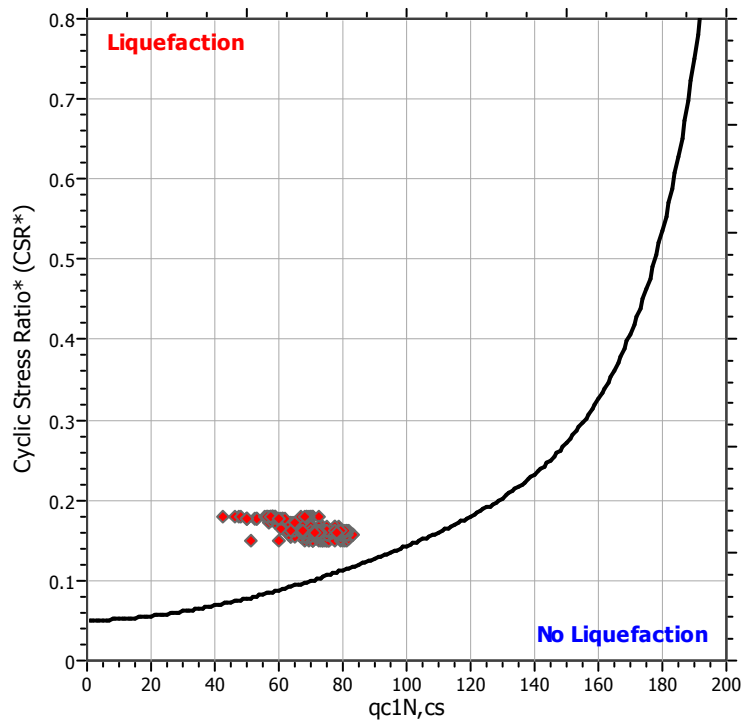
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.80 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.45 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.25	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



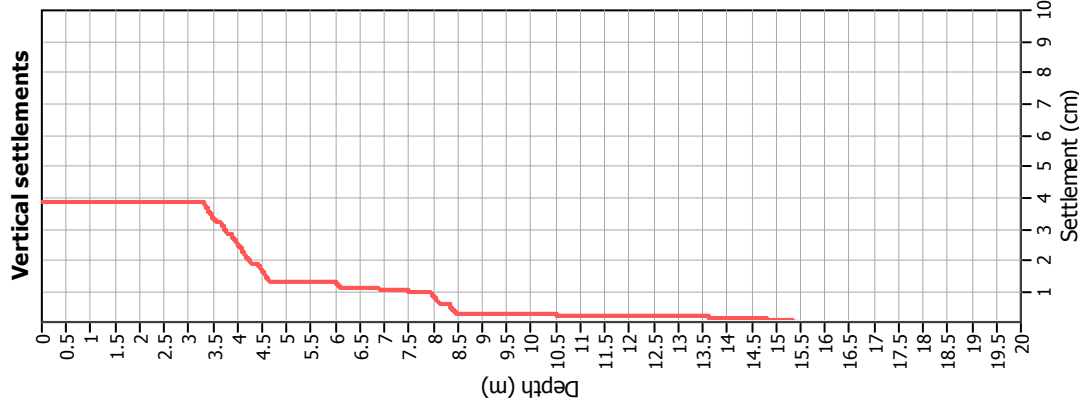
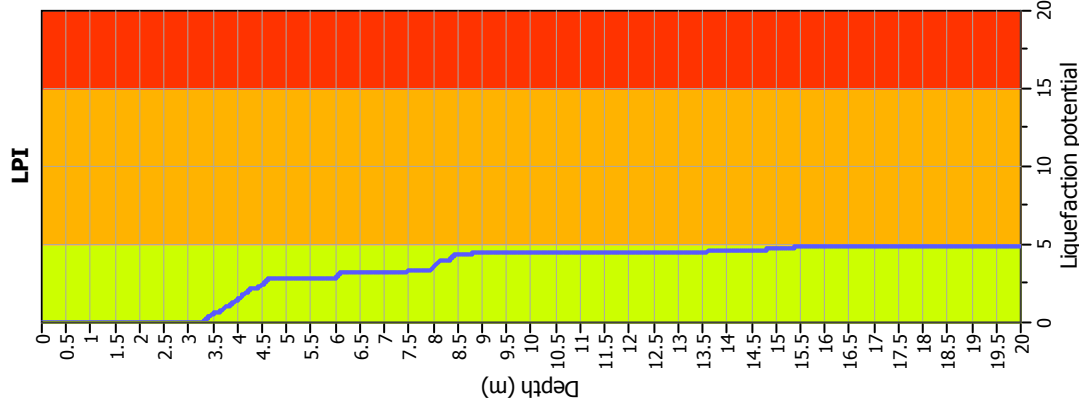
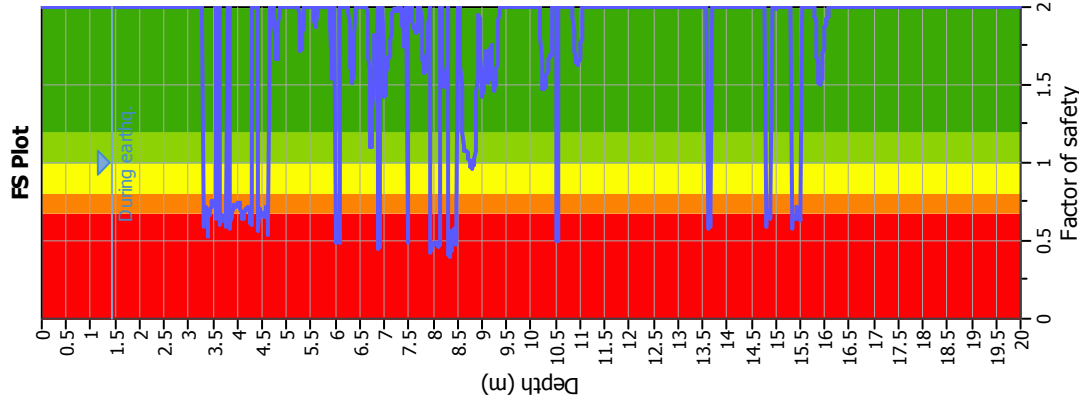
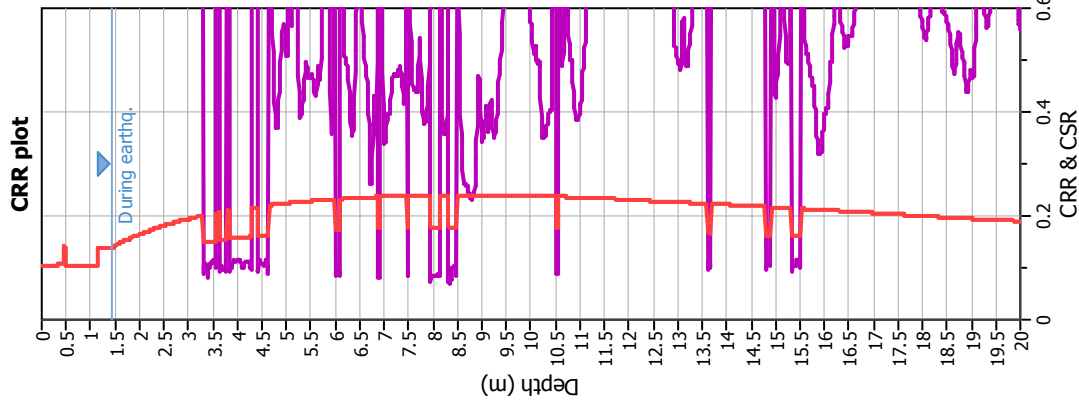
$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve

**Summary of liquefaction potential**



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.25  
 Depth to water table (insitu): 2.80 m

Depth to GWT (earthq.): 1.45 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 $K_0$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

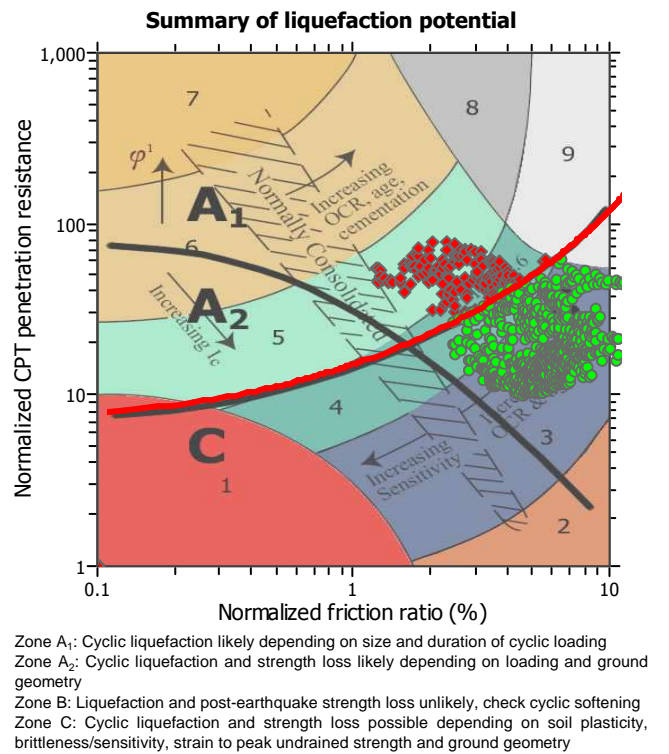
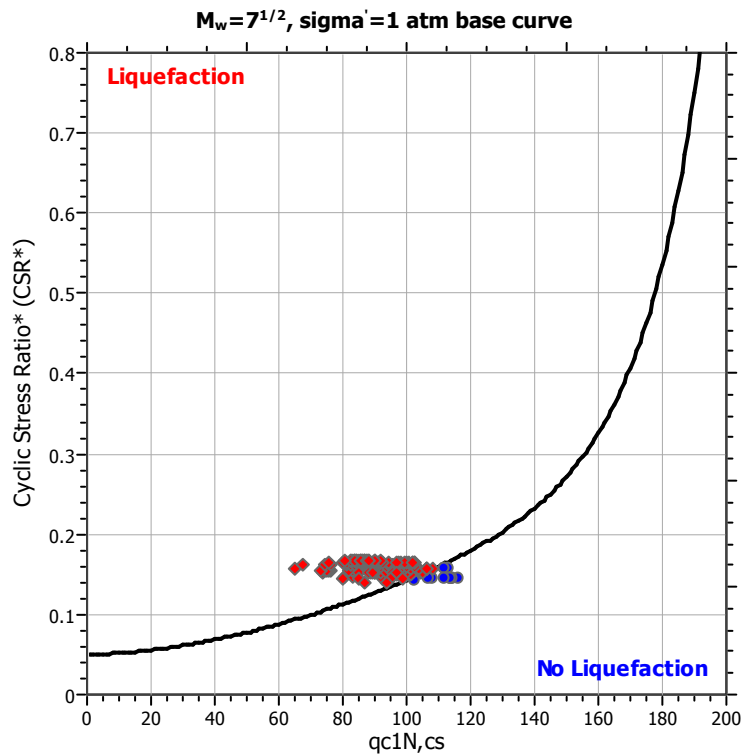
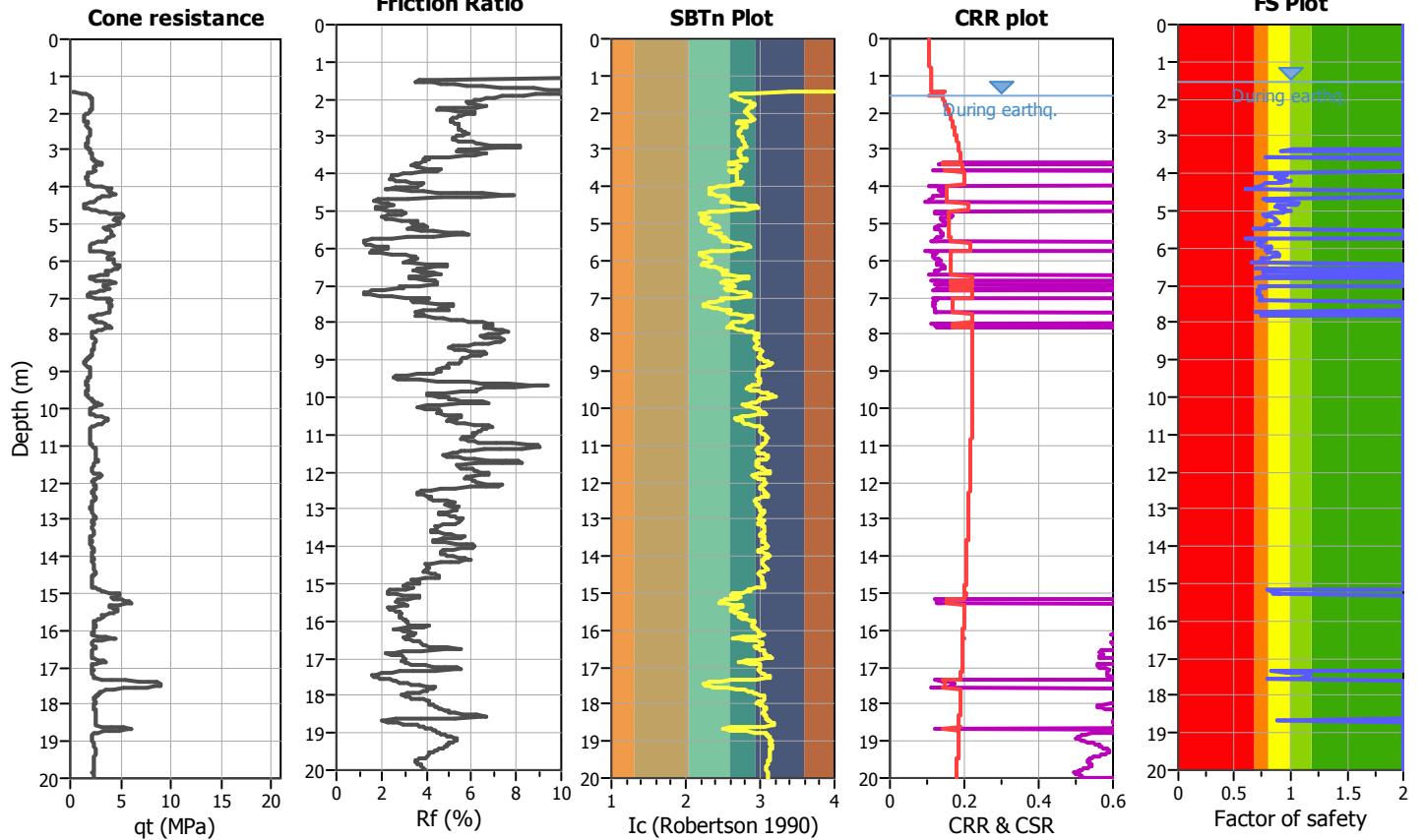
**Project title :**

**Location :**

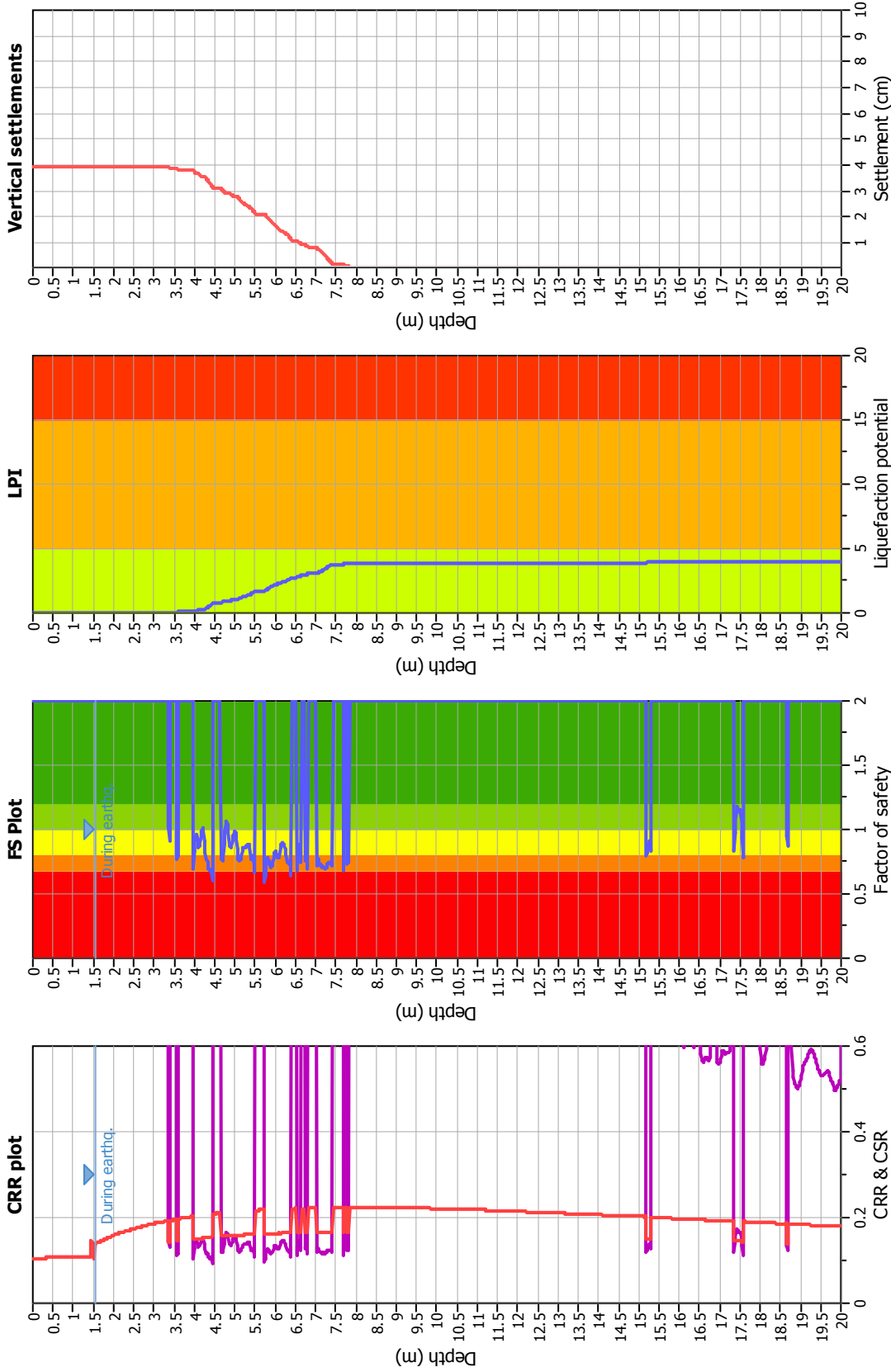
**CPT file : P24CPTU37**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.65 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.55 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSE method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.25  
 Depth to water table (insitu): 1.65 m

Depth to GWT (earthq.): 1.55 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

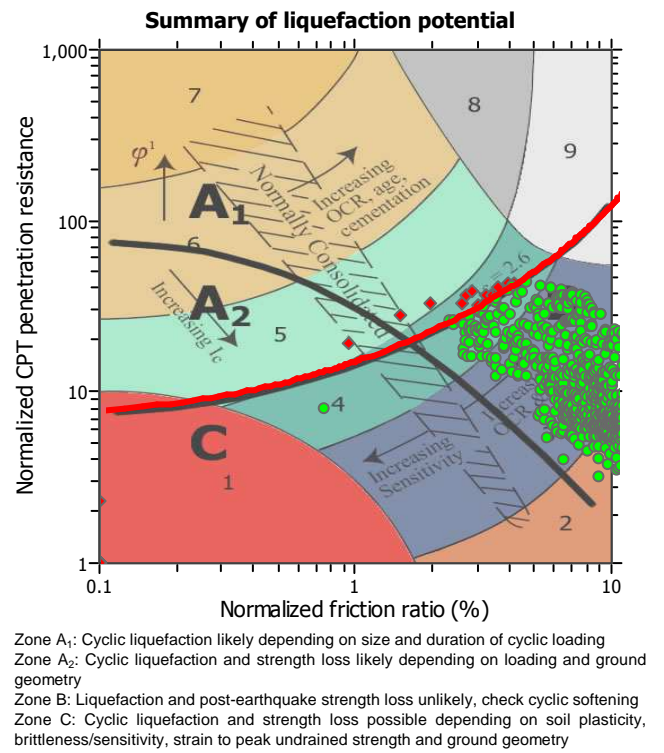
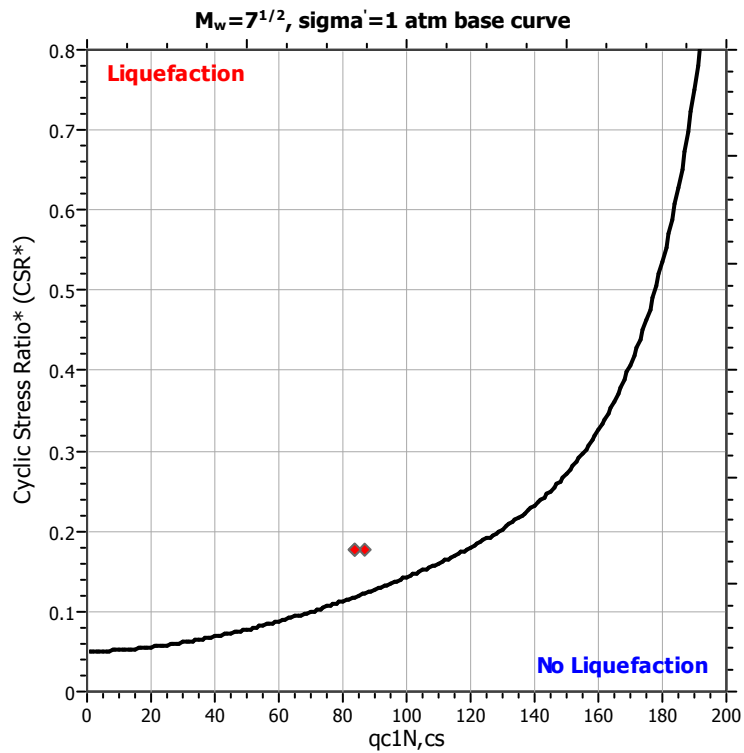
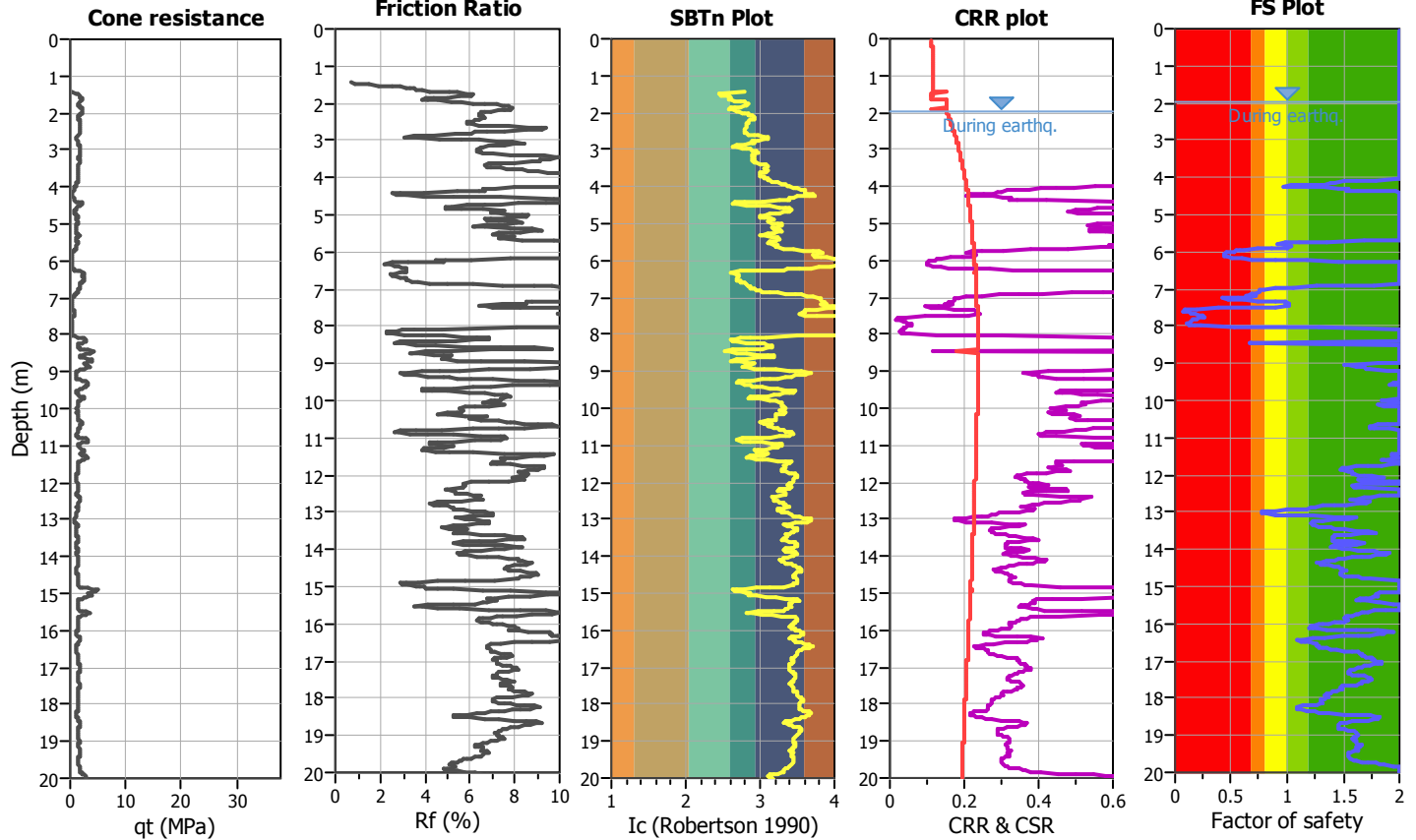
**Project title :**

**Location :**

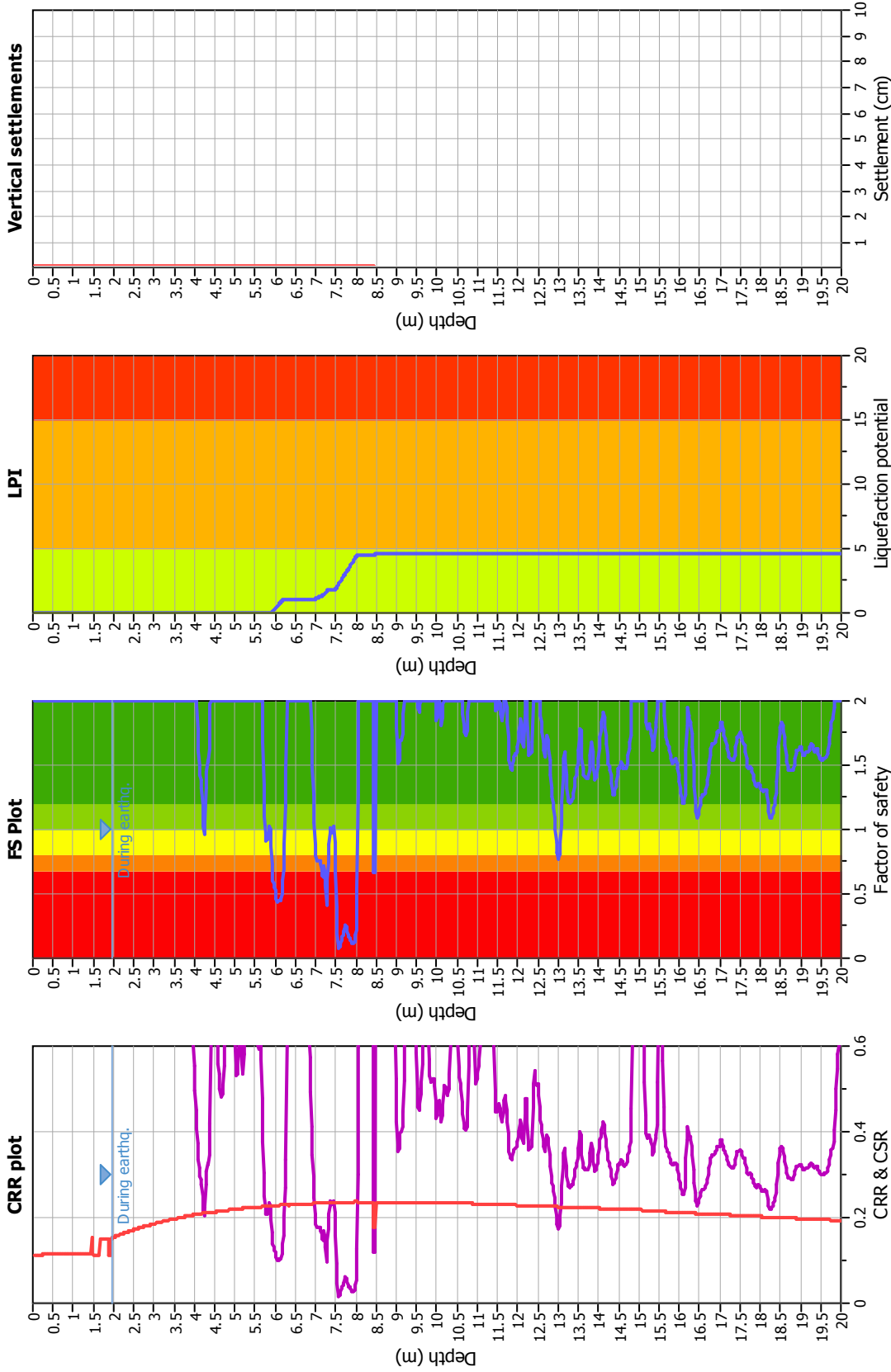
**CPT file : P26CPTU40**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	4.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.95 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



## Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 4.00 m

### F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.95 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

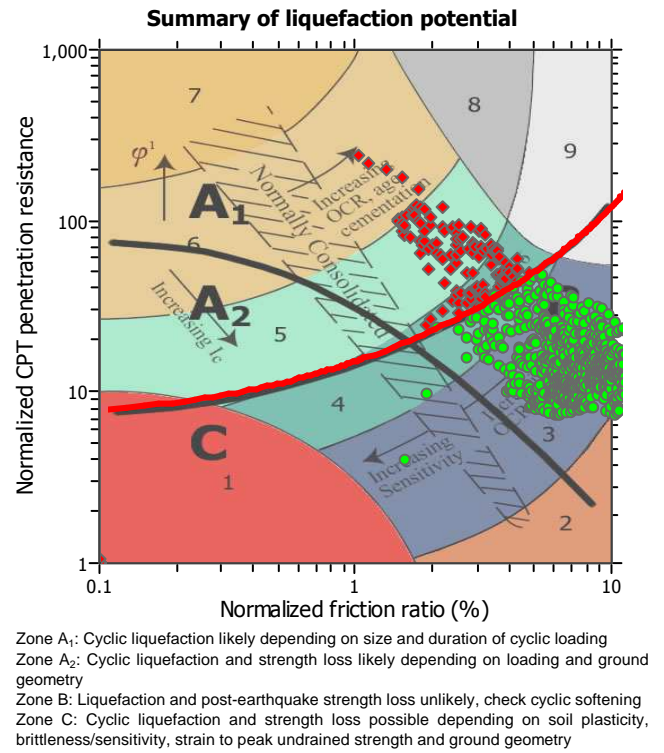
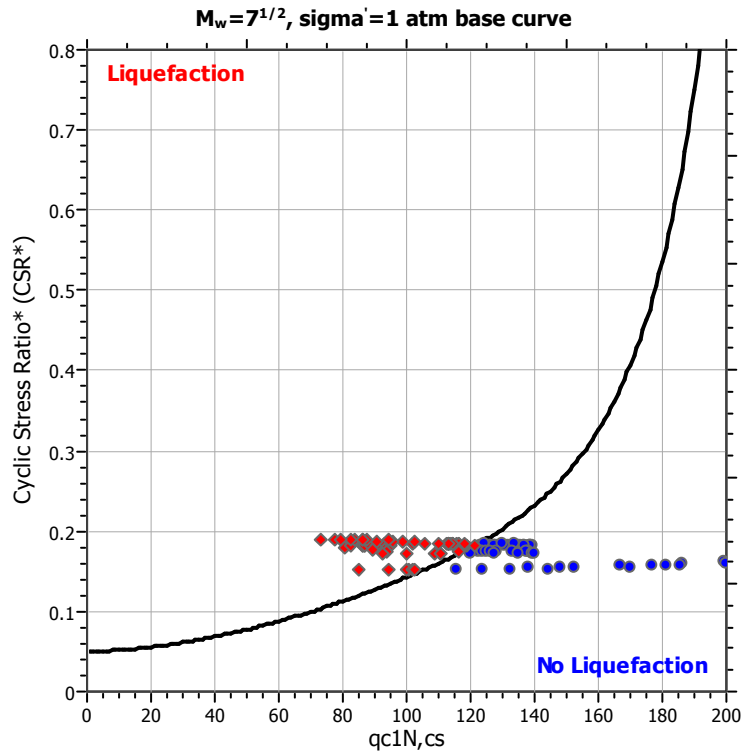
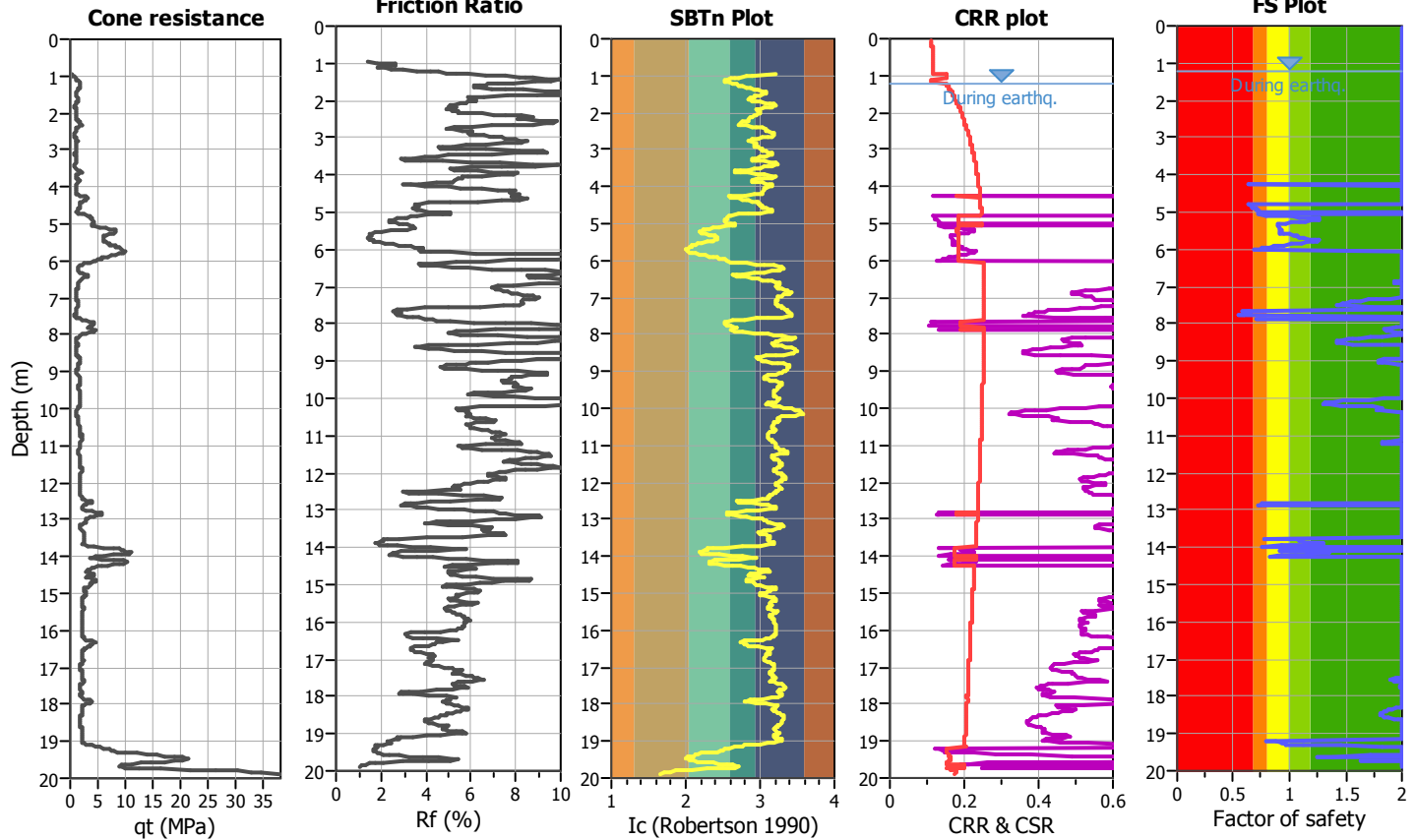
**Project title :**

**Location :**

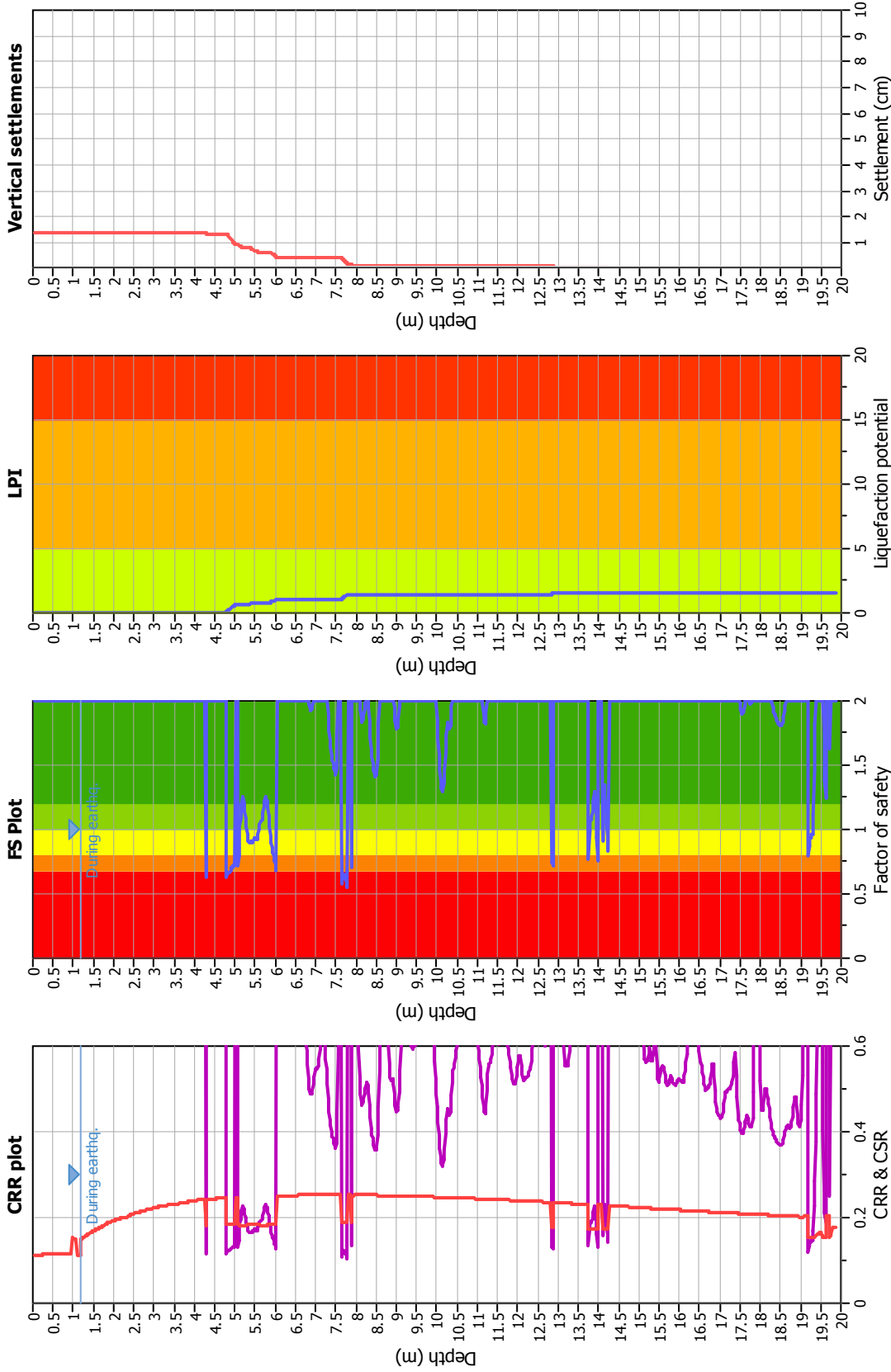
**CPT file : P27CPTU42**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	4.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 4.00 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect: applied: No  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.20 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

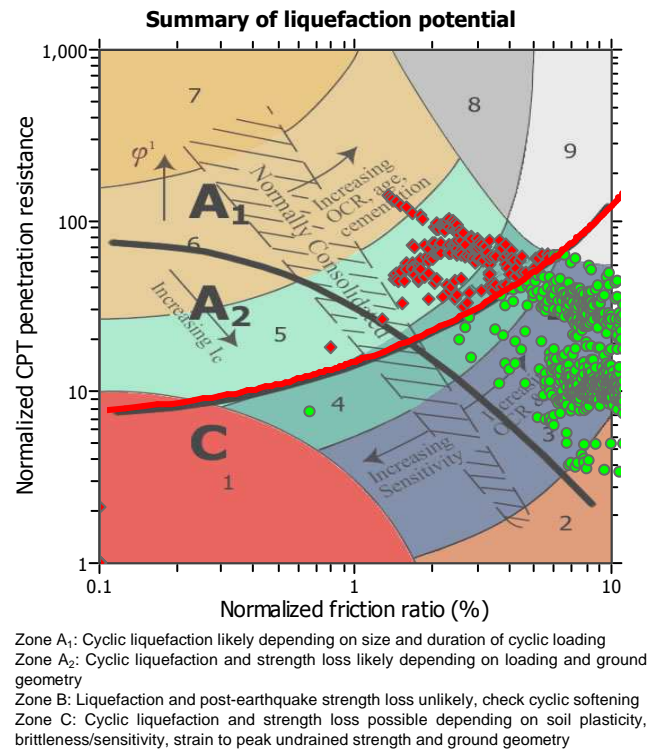
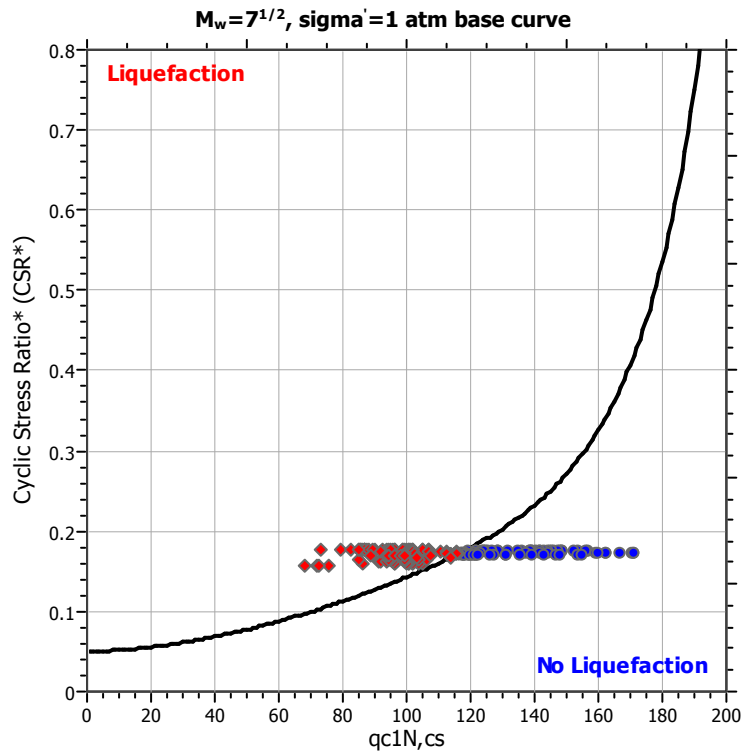
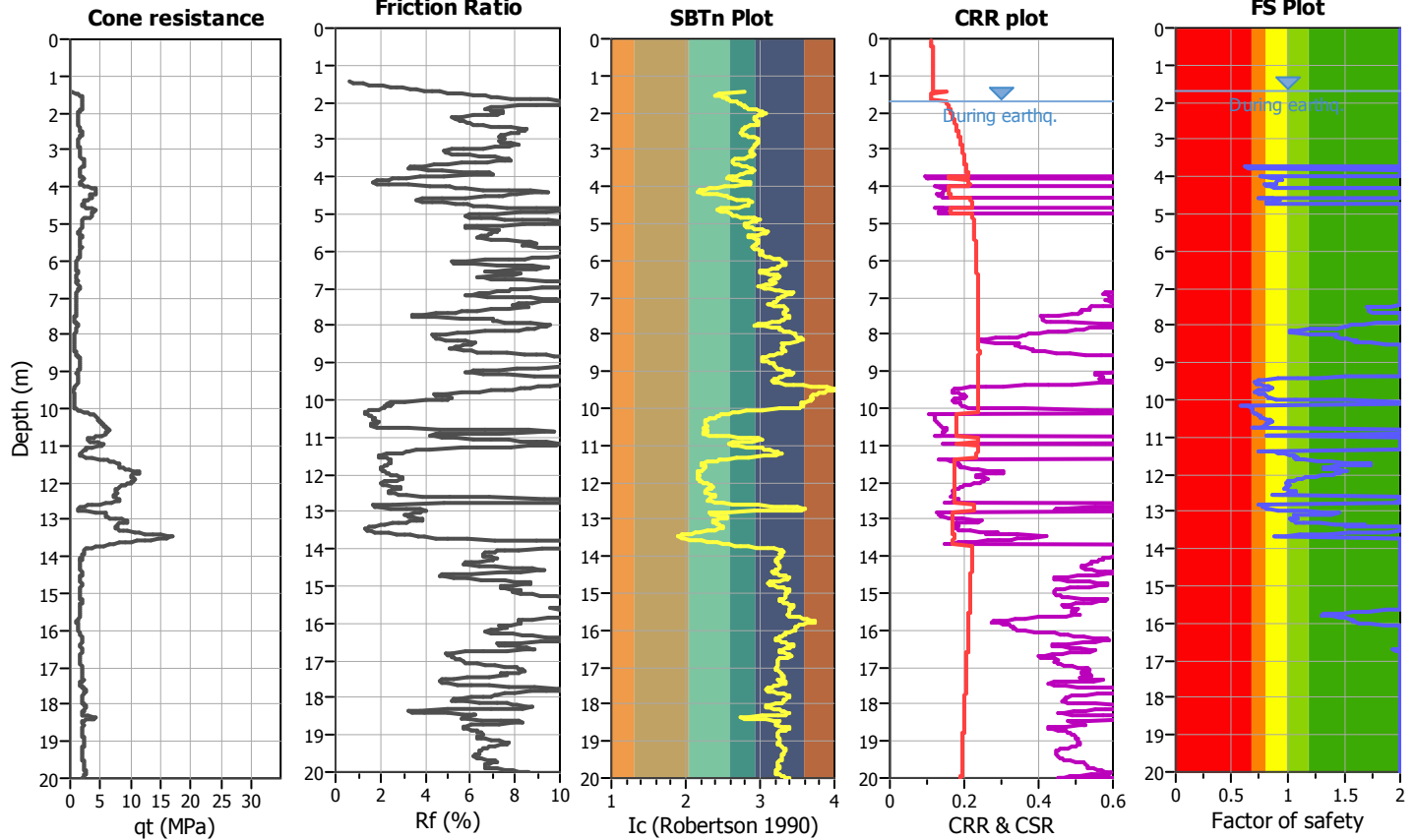
**Project title :**

**Location :**

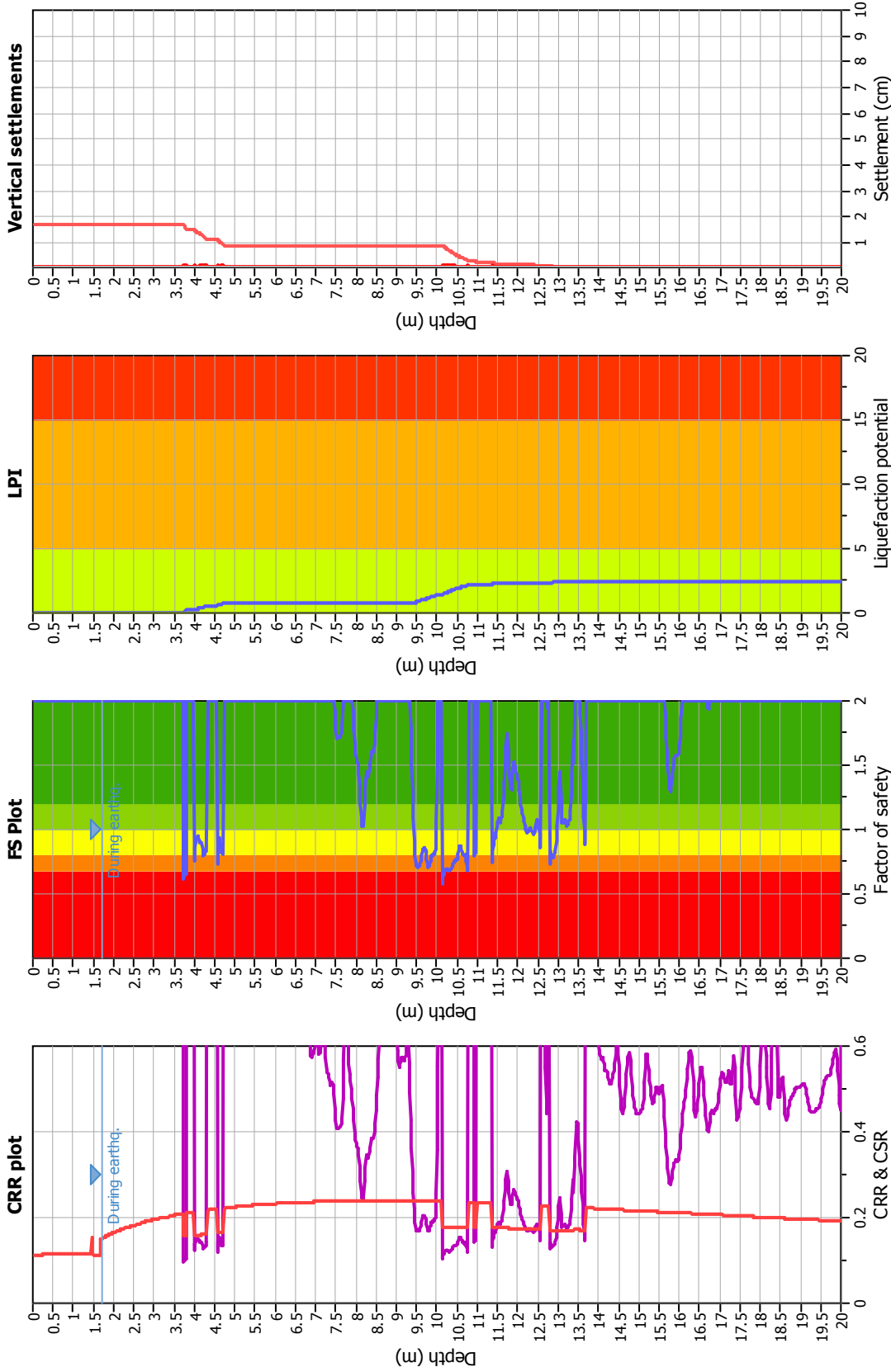
**CPT file : P28CPTU44**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.25 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.70 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.25 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect: applied: No  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.70 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

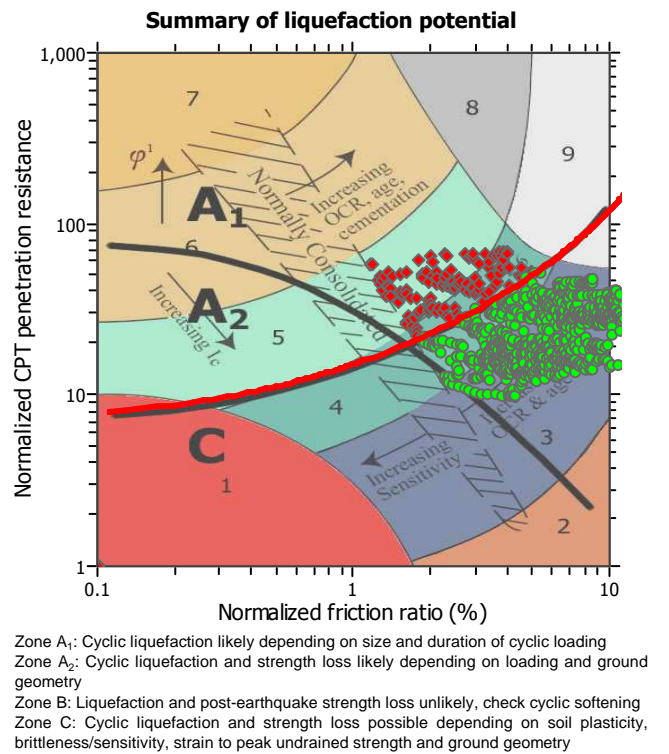
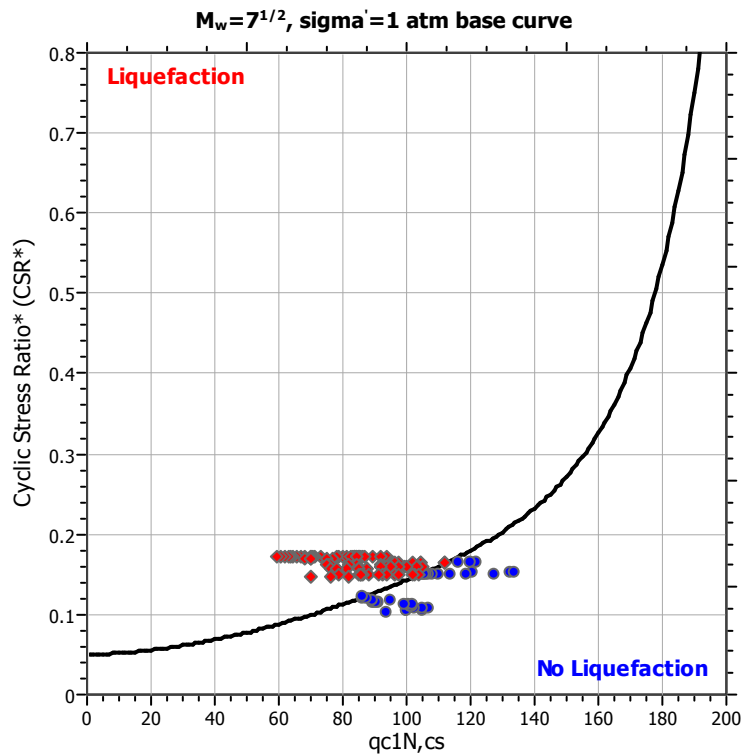
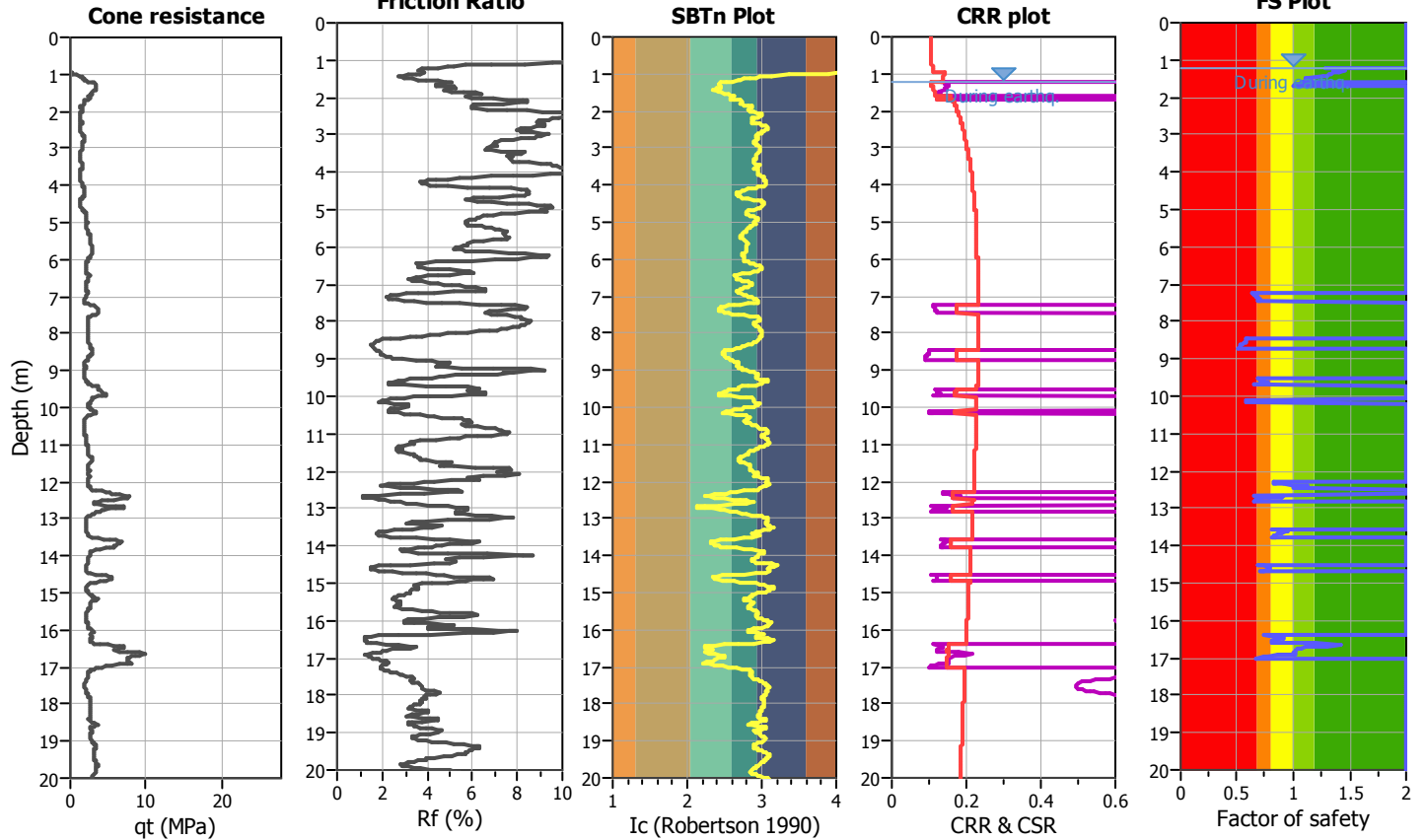
**Project title :**

**Location :**

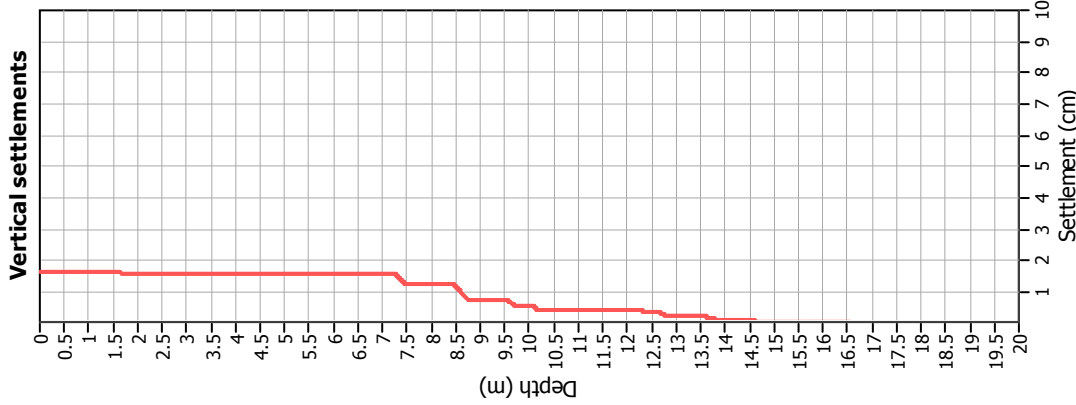
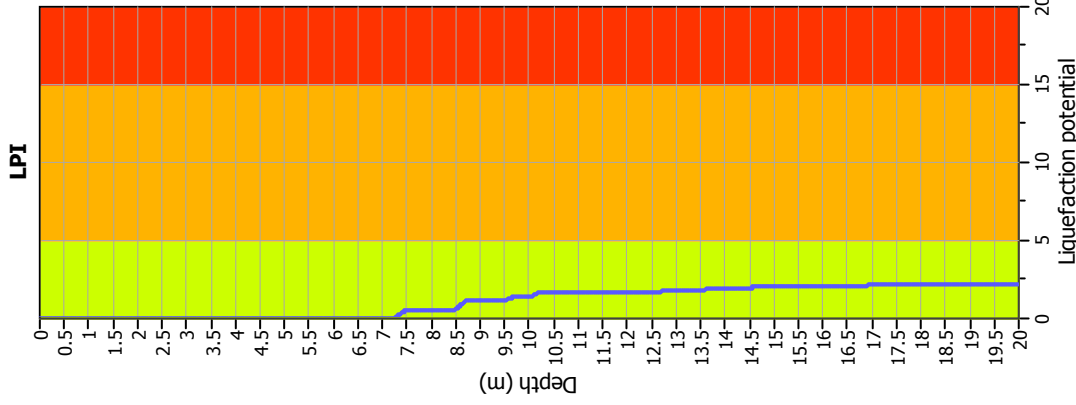
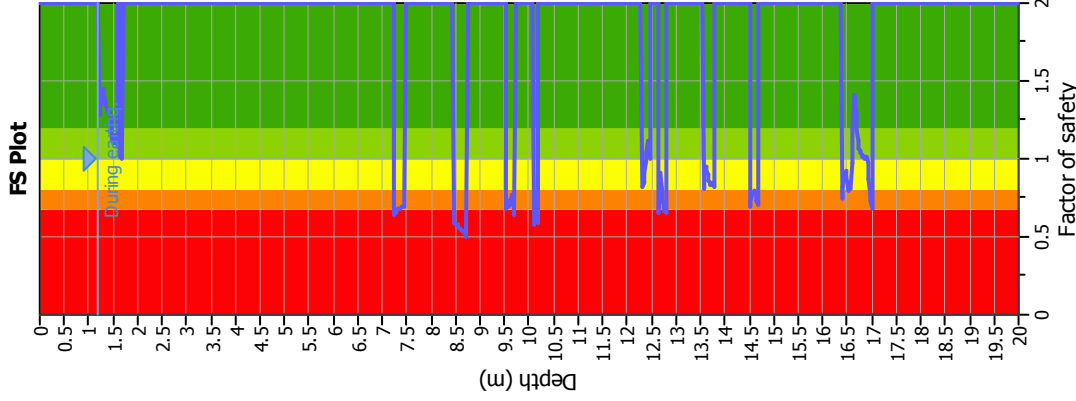
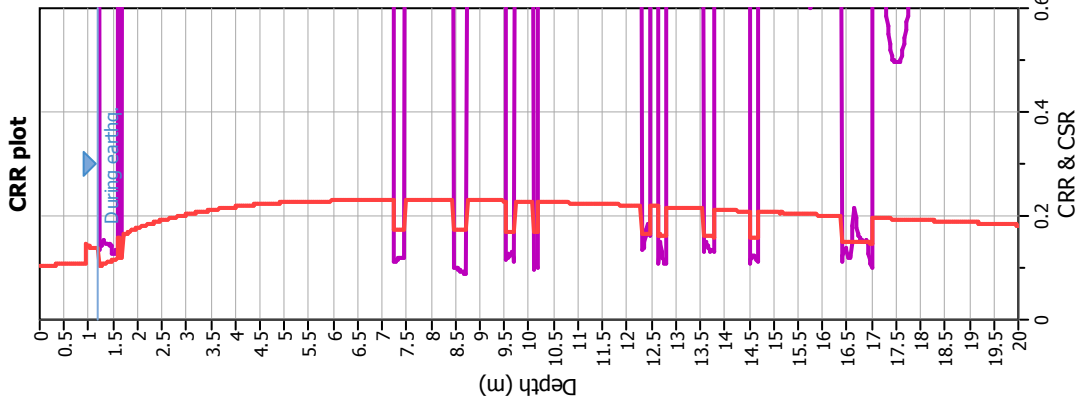
**CPT file : P218CPTU257**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.10 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.25  
 Depth to water table (insitu): 1.10 m

Depth to GWT (earthq.): 1.20 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

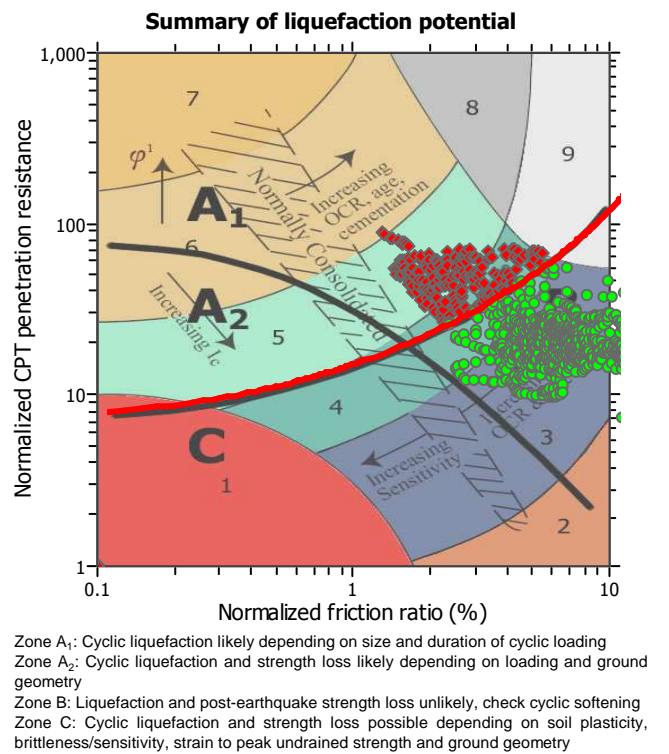
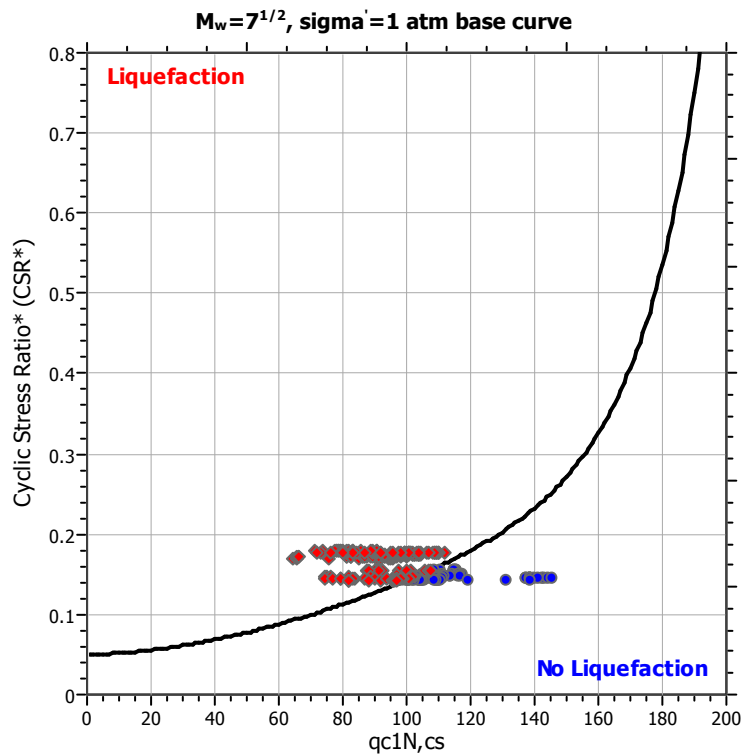
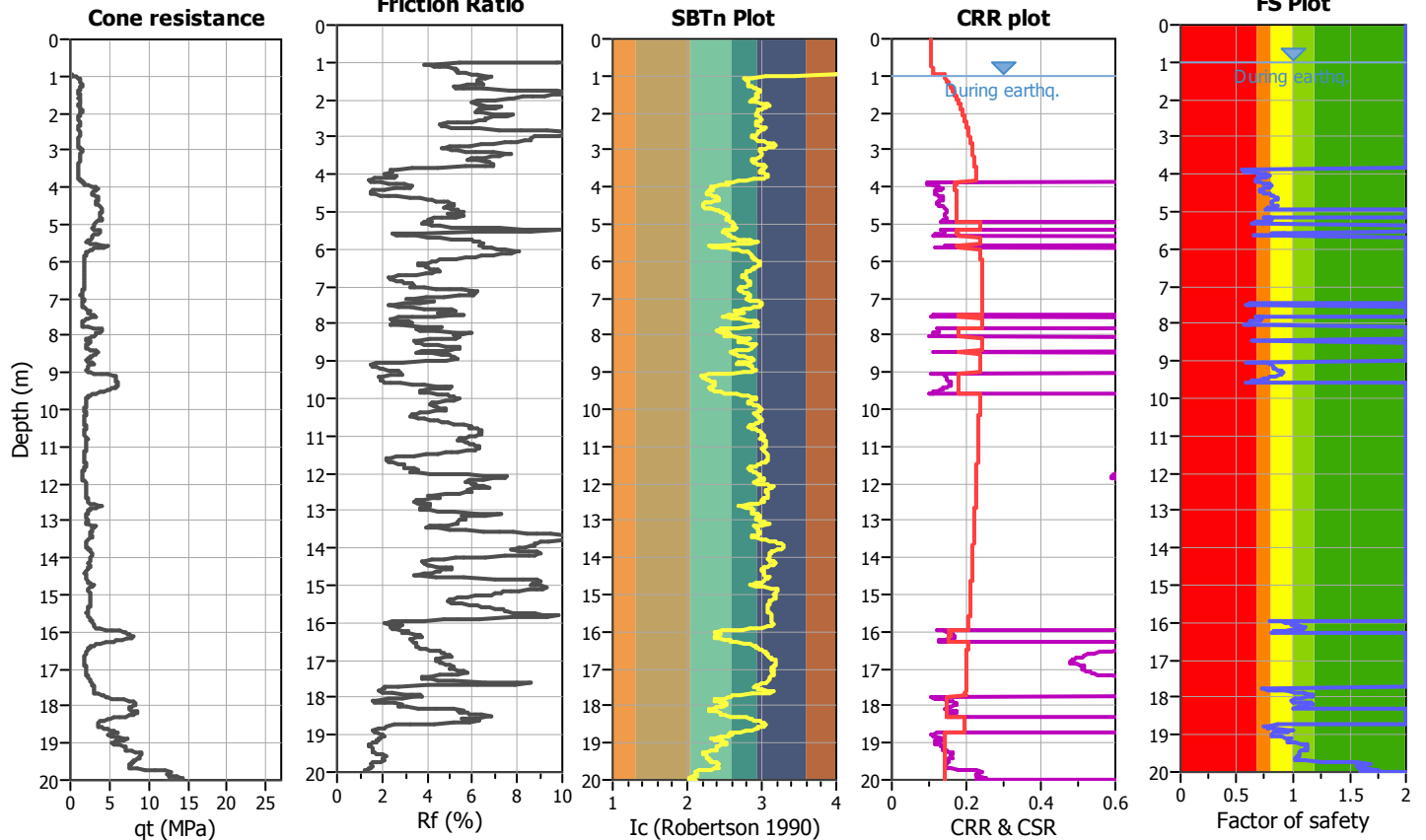
**Project title :**

**Location :**

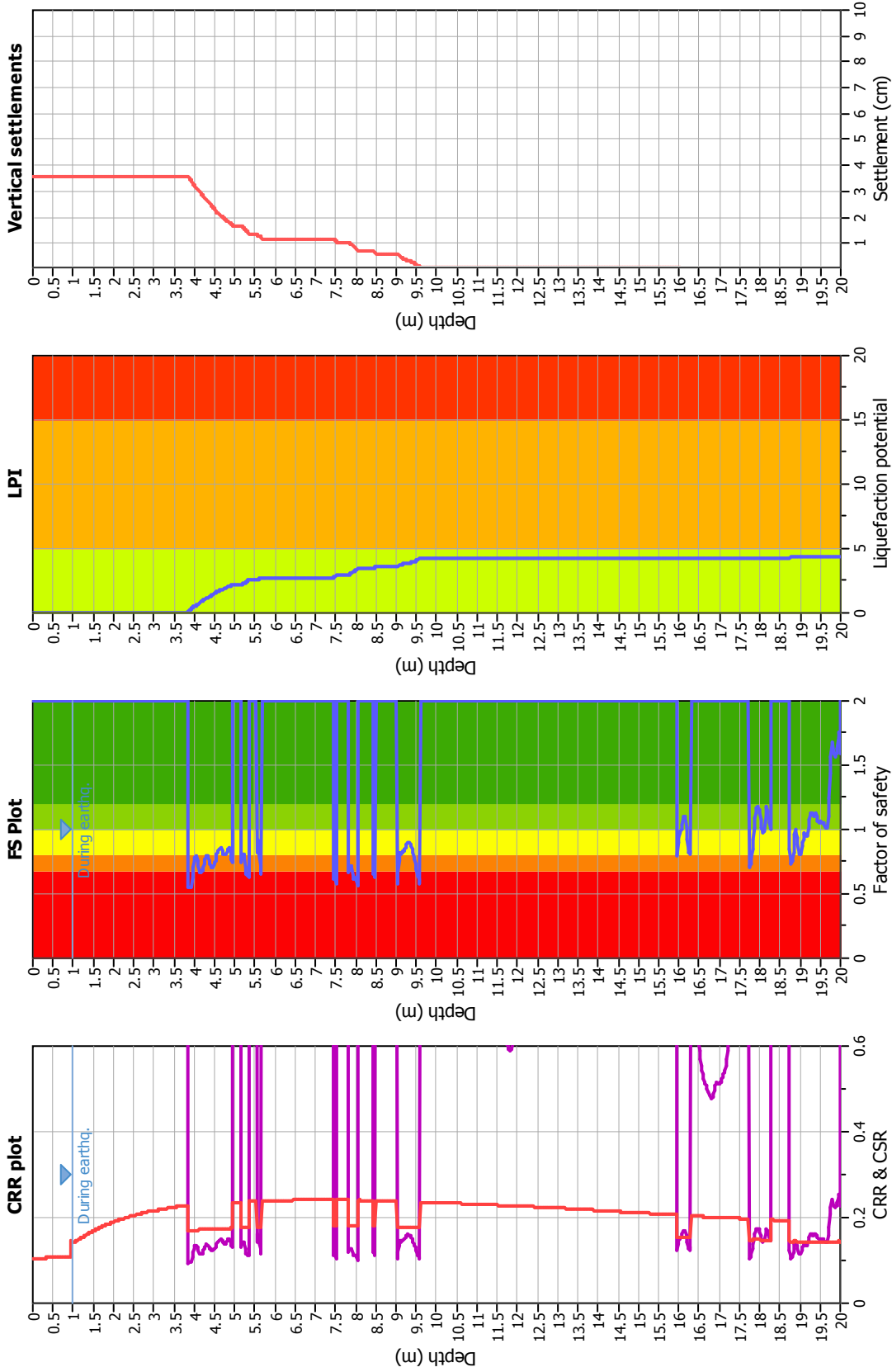
**CPT file : P219CPTU258**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



## Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.25  
 Depth to water table (insitu): 1.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

### F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

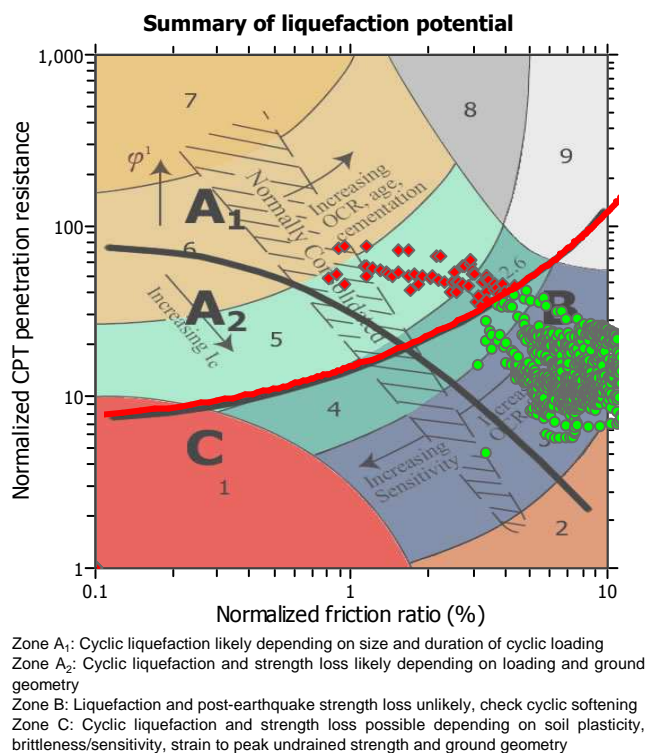
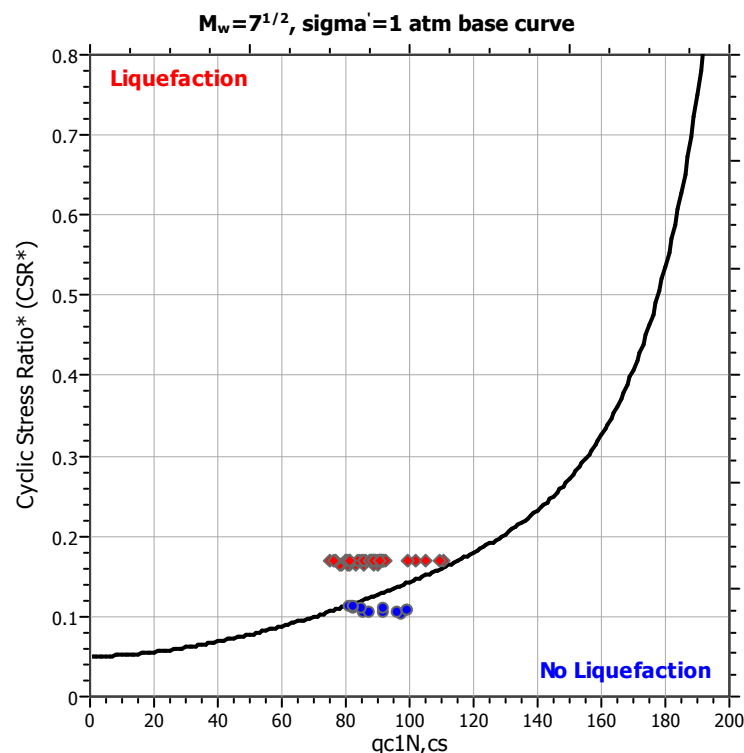
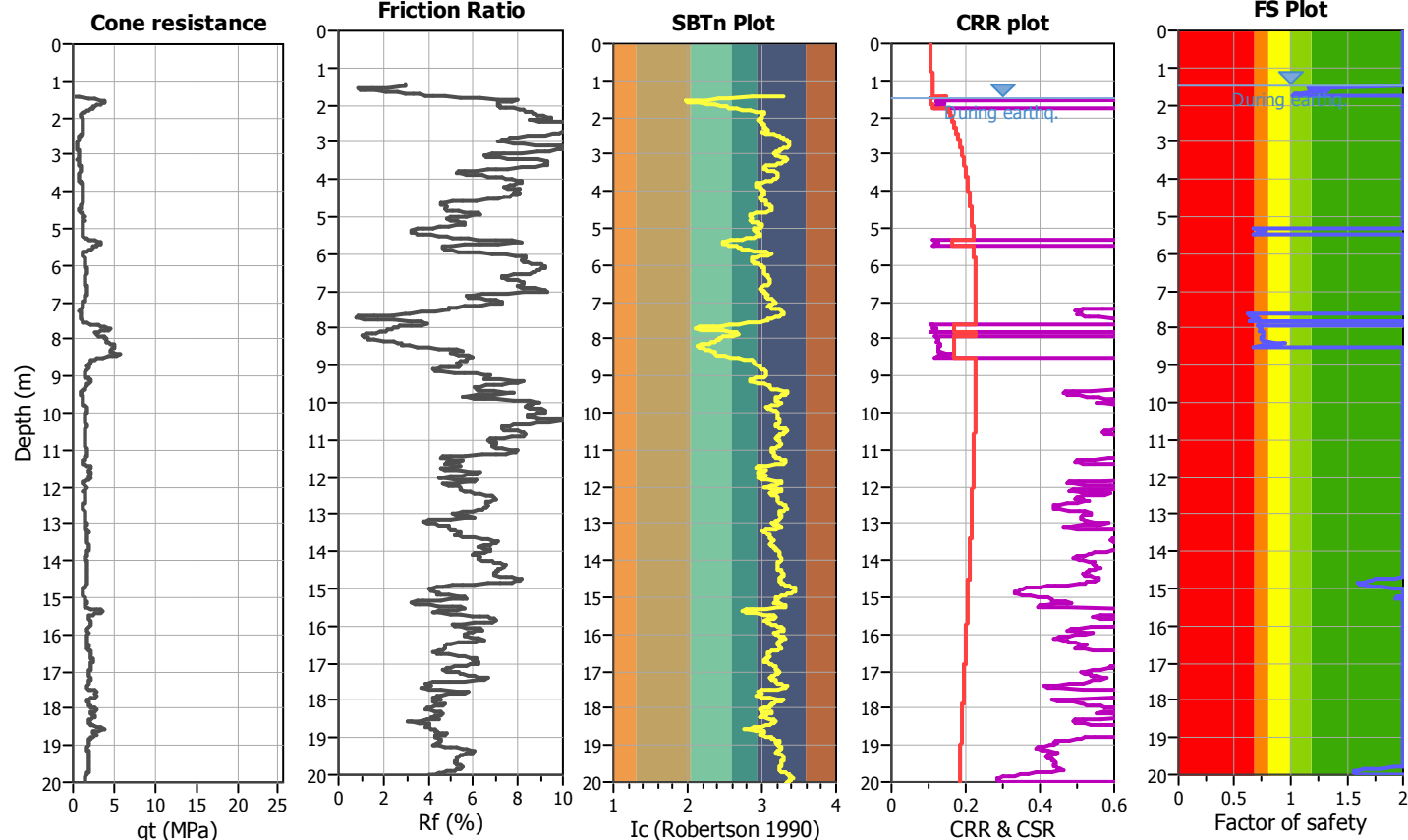
**Project title :**

**Location :**

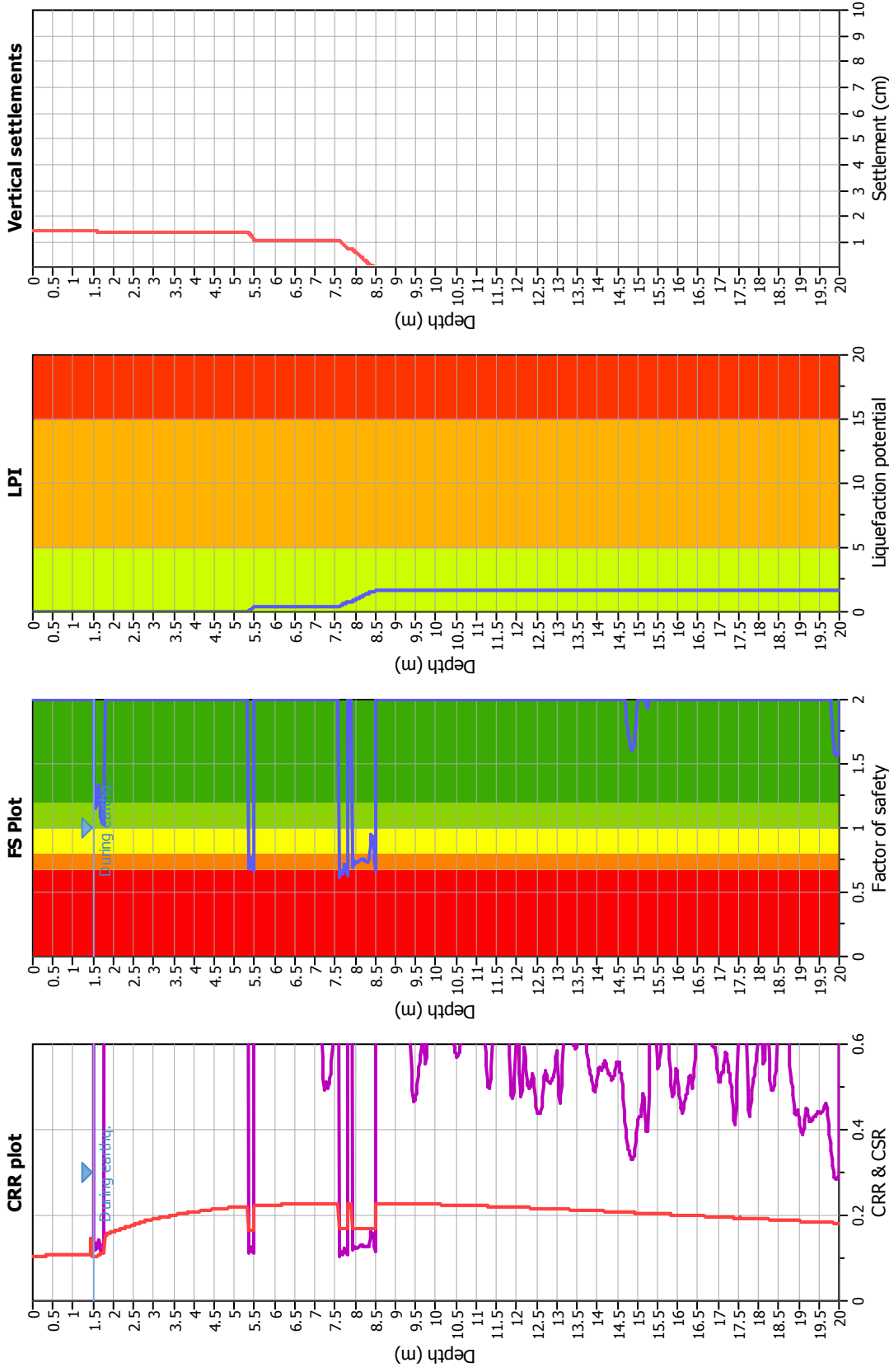
**CPT file : P272CPTU312**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.20 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on  $I_c$  value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.25  
 Depth to water table (insitu): 1.20 m

Depth to GWT (earthq.): 1.50 m  
 Average results interval: 3  
 $I_c$  cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

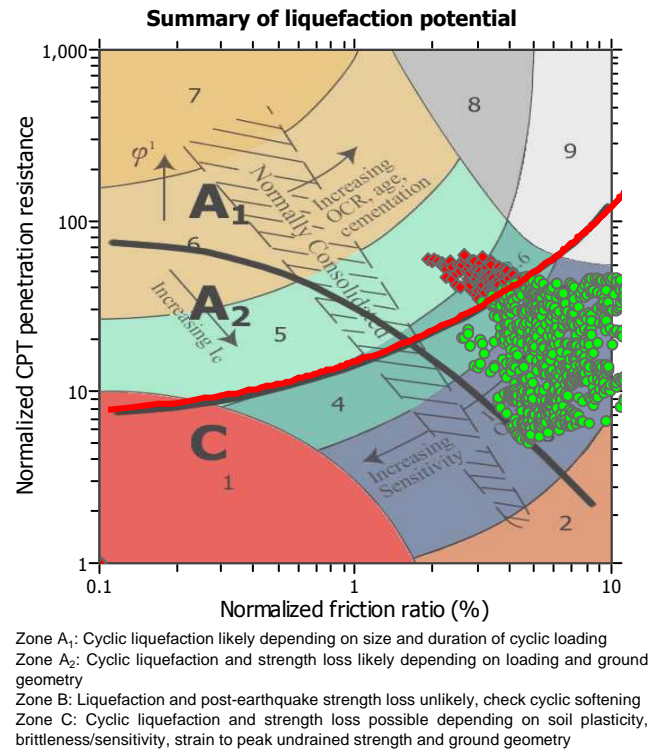
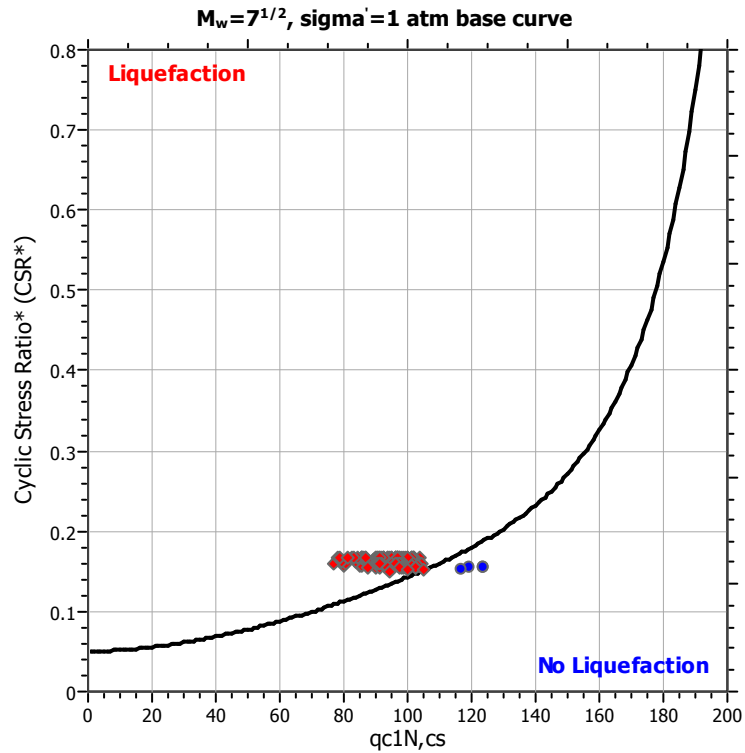
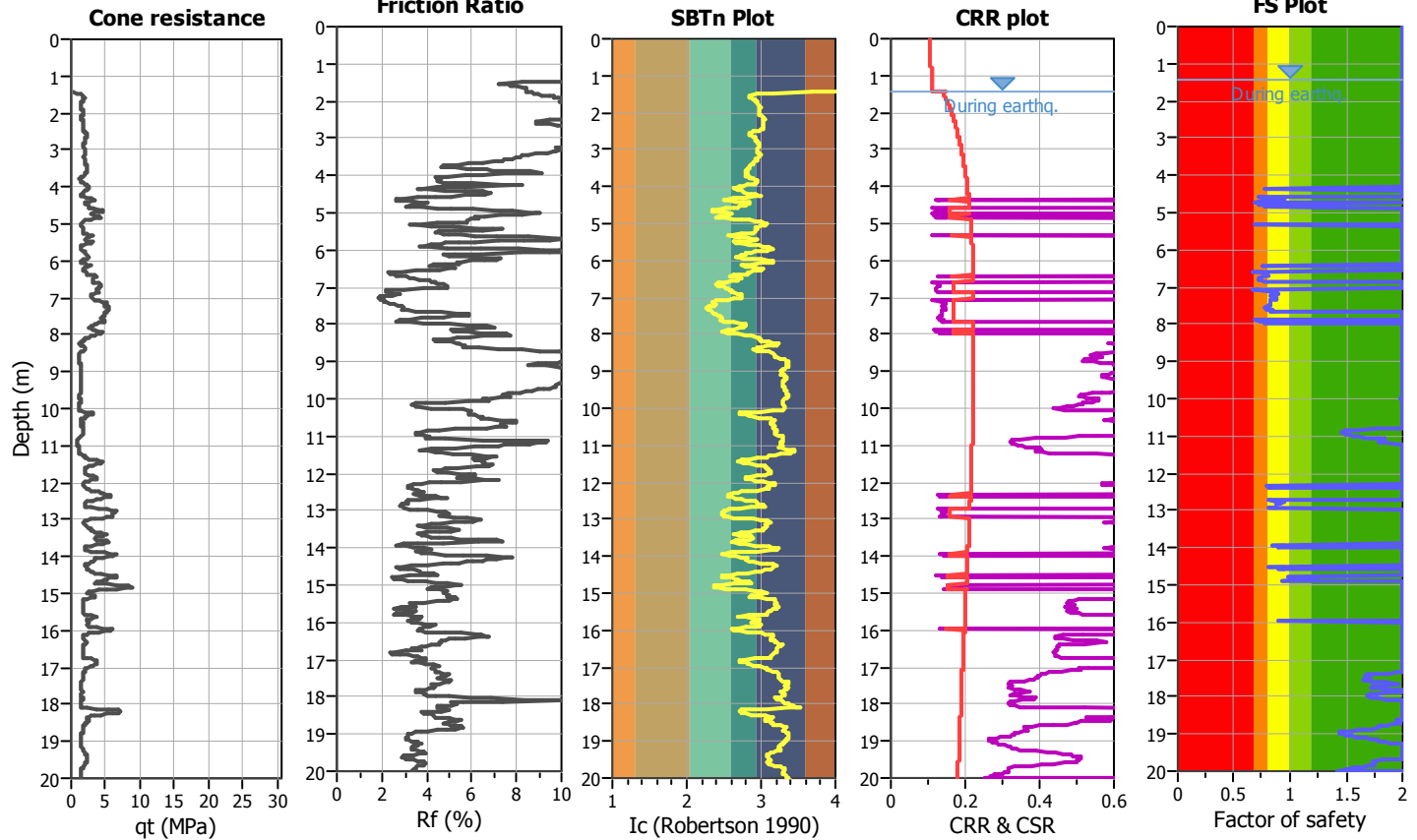
**Project title :**

**Location :**

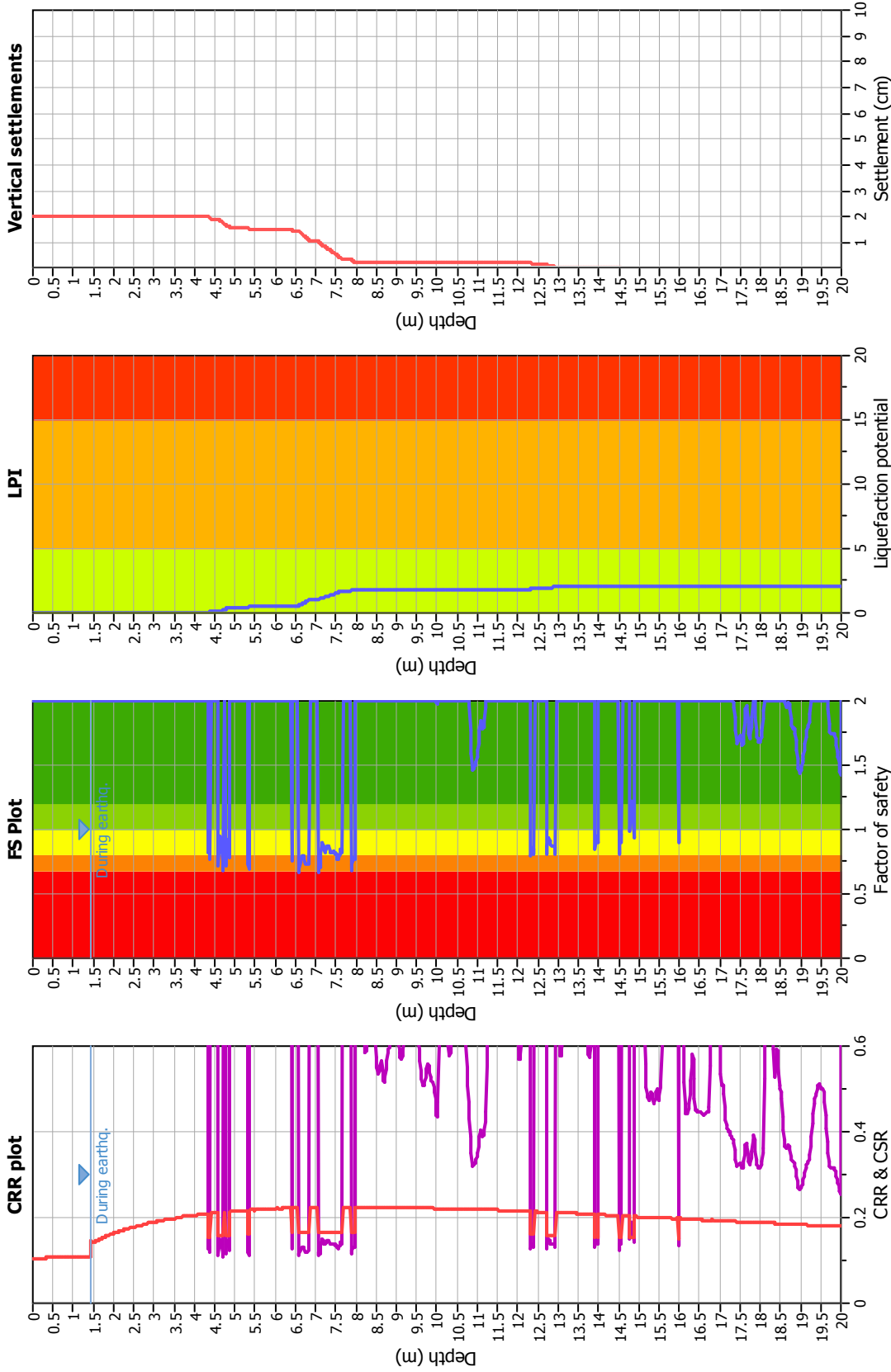
**CPT file : P273CPTU313**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.90 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.45 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (earthq.):	1.45 m
Fines correction method:	R&W (1998)	Average results interval:	3
Points to test:	Based on I <sub>c</sub> value	I <sub>c</sub> cut-off value:	2.60
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No
Depth to water table (insitu):	1.90 m	Fill height:	N/A
		Fill weight:	N/A
		Transition detect. applied:	No
		K <sub>σ</sub> applied:	Yes
		Clay like behavior applied:	Sand & Clay
		Limit depth applied:	Yes
		Limit depth:	20.00 m

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

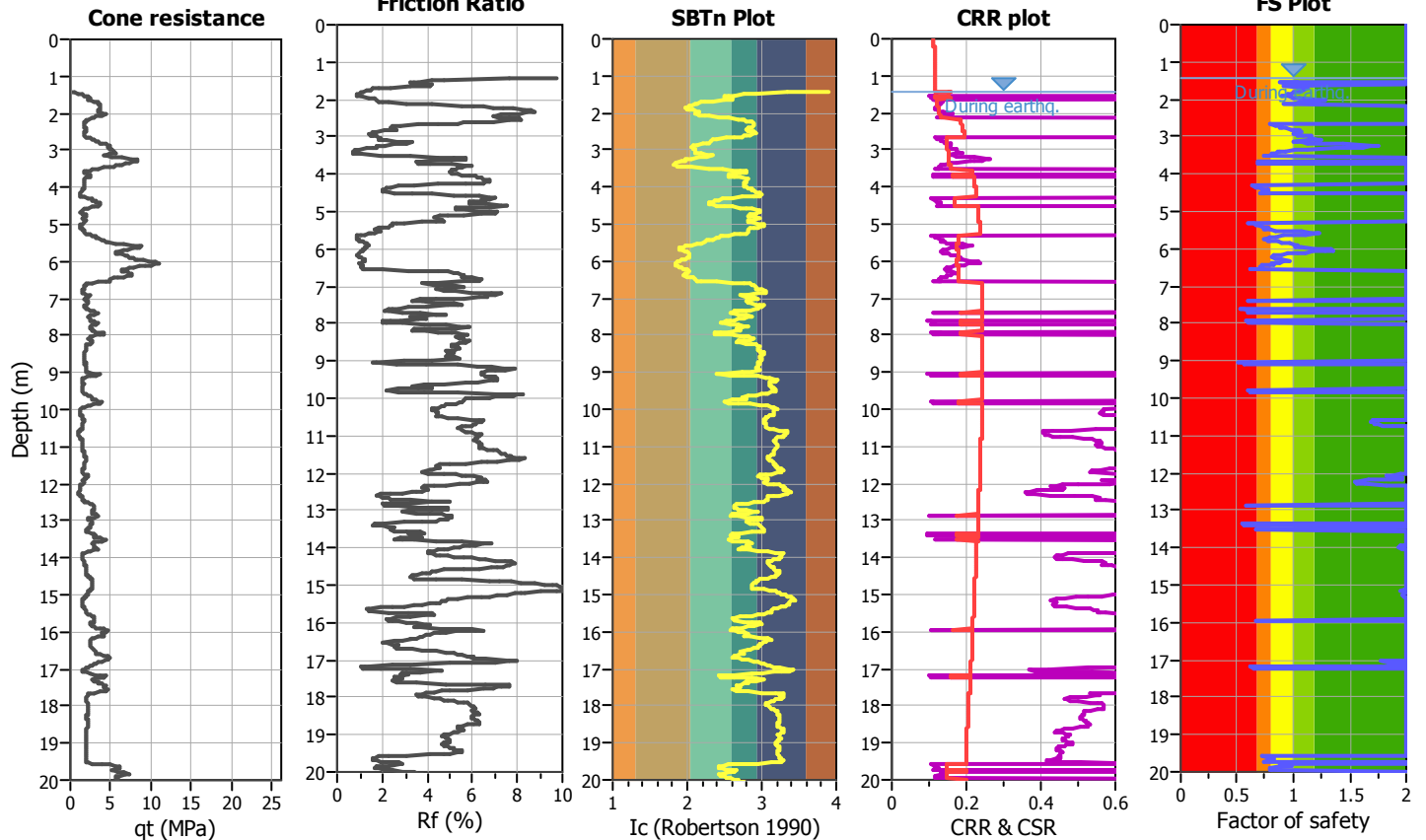
**Project title :**

**Location :**

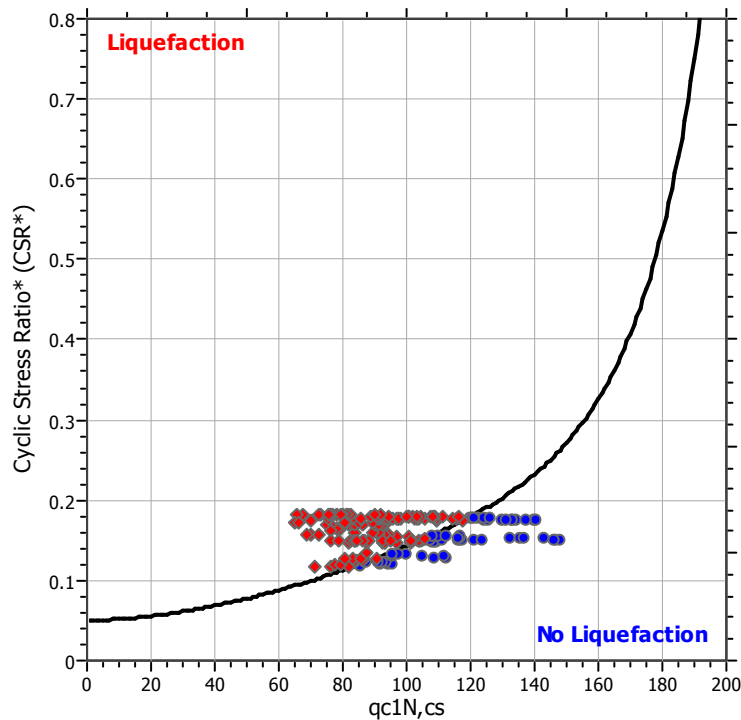
**CPT file : P274CPTU314**

**Input parameters and analysis data**

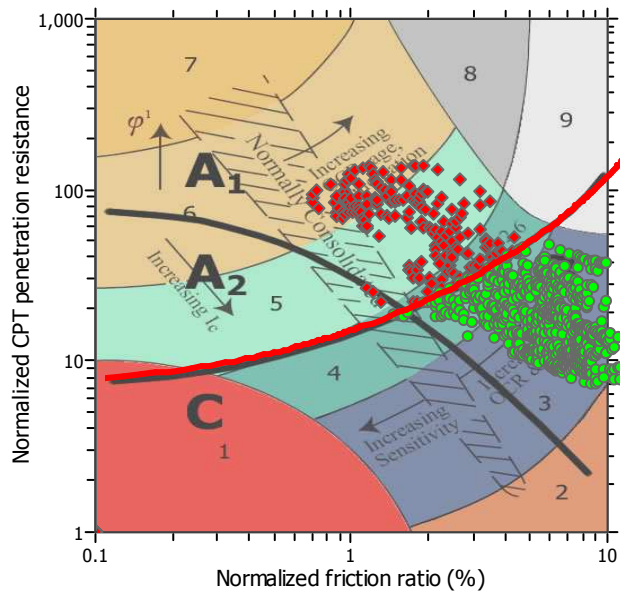
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.55 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.45 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSE method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve

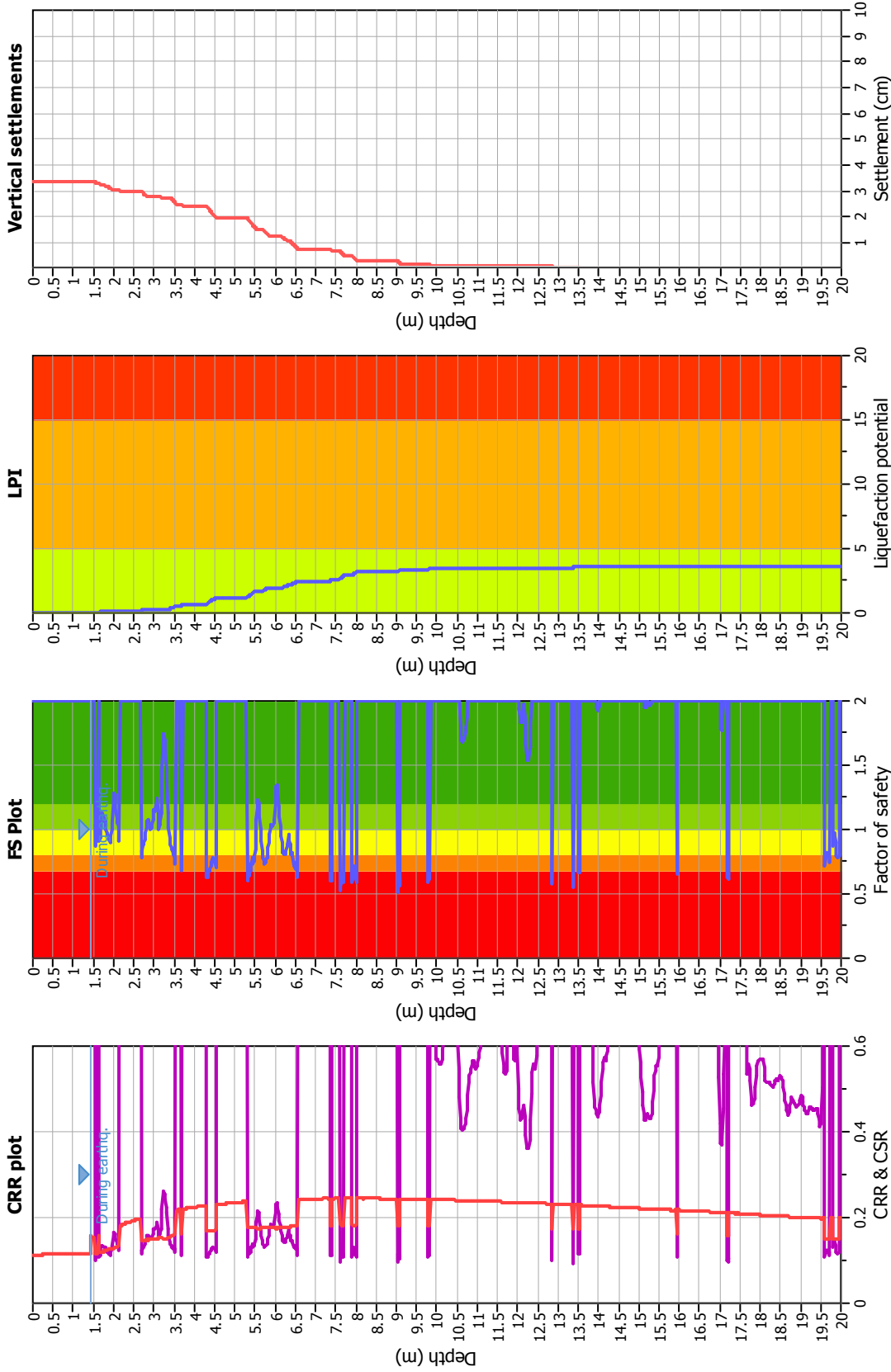


**Summary of liquefaction potential**



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.55 m

## F.S. color scheme

Fill weight: 1.45 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

## LPI color scheme

Transition detect: applied: N/A  
 $K_s$  applied: No  
 Clay like behavior applied: Yes  
 Limit depth applied: Sand & Clay  
 Limit depth: 20.00 m

## F.S. color scheme

Almost certain it will liquefy  
 Very likely to liquefy  
 Liquefaction and no liq. are equally likely  
 Unlikely to liquefy  
 Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

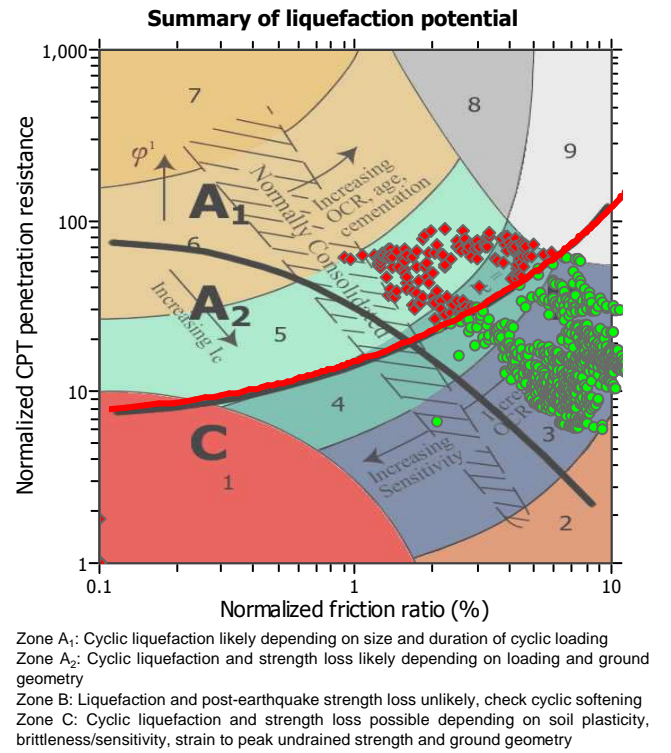
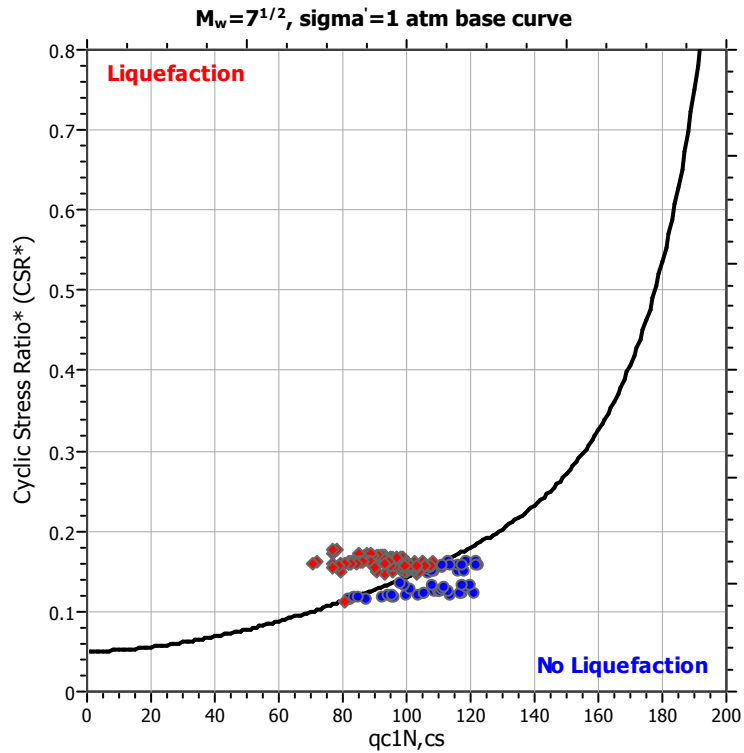
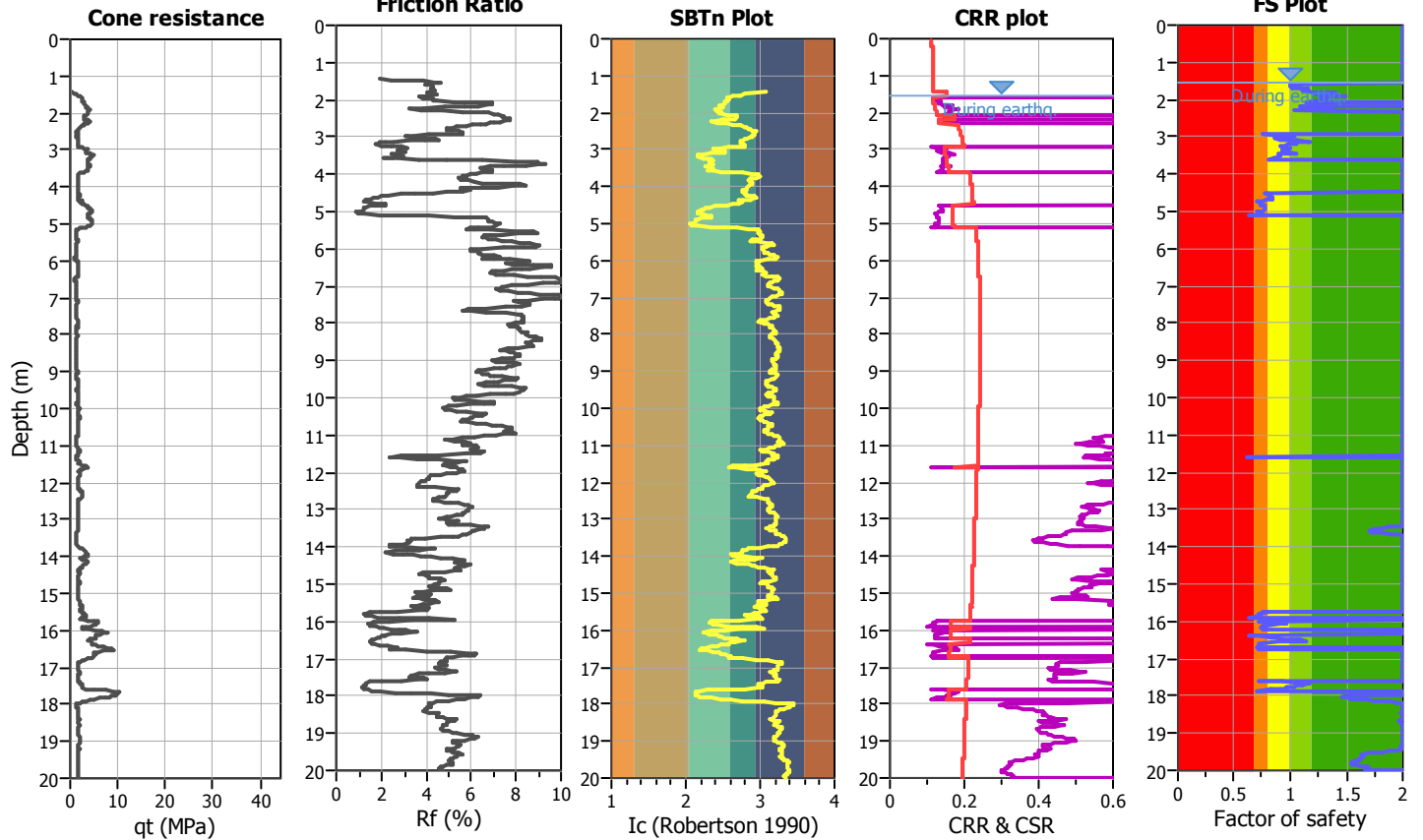
**Project title :**

**Location :**

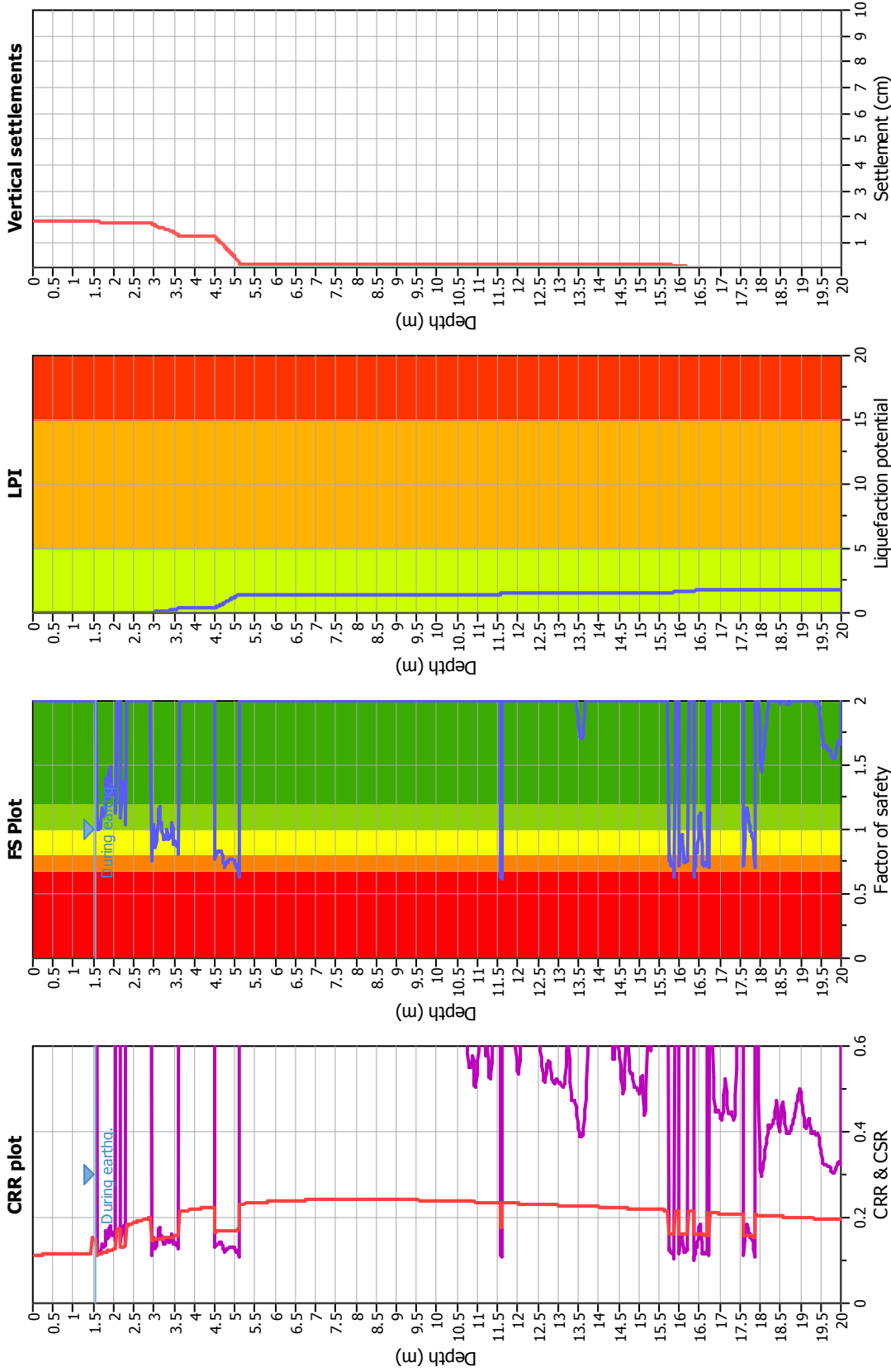
**CPT file : P275CPTU315**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.55 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.30 m

Depth to GWT (earthq.): 1.55 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

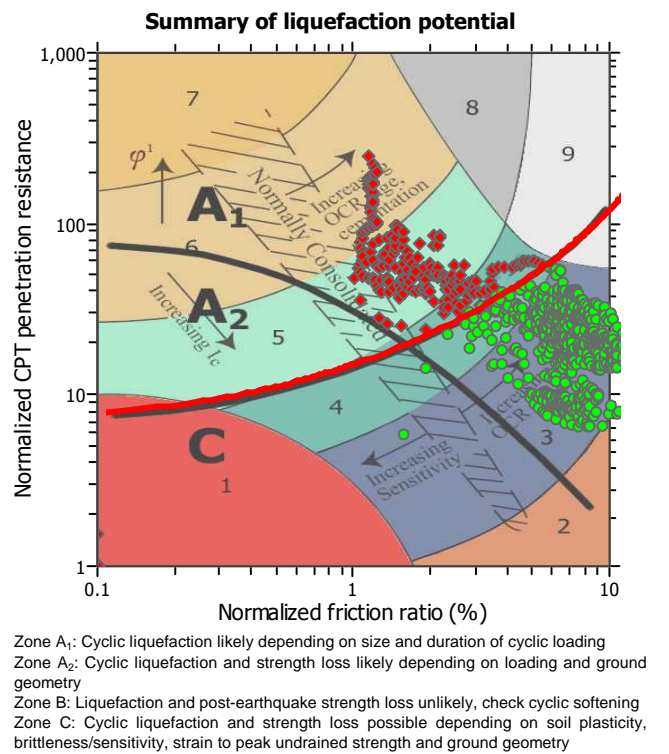
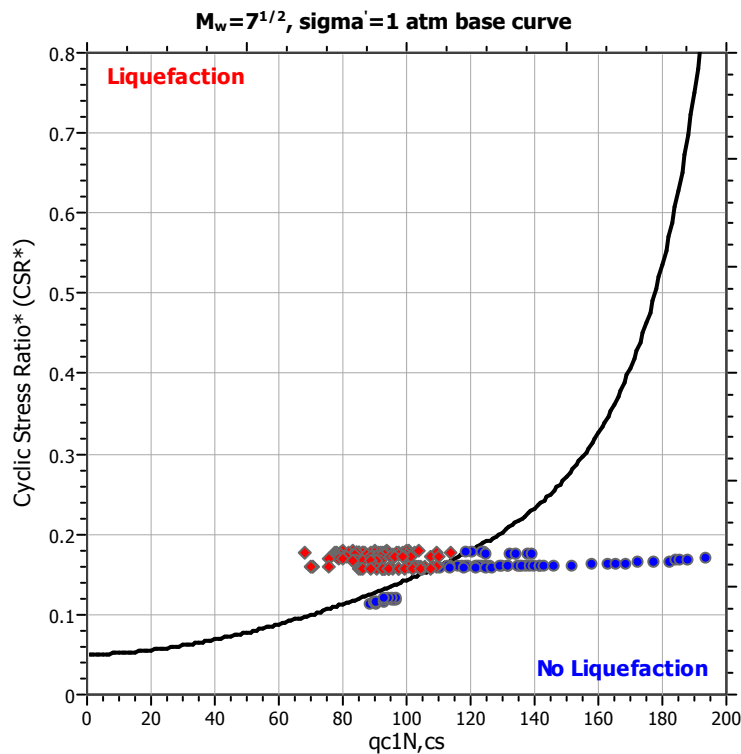
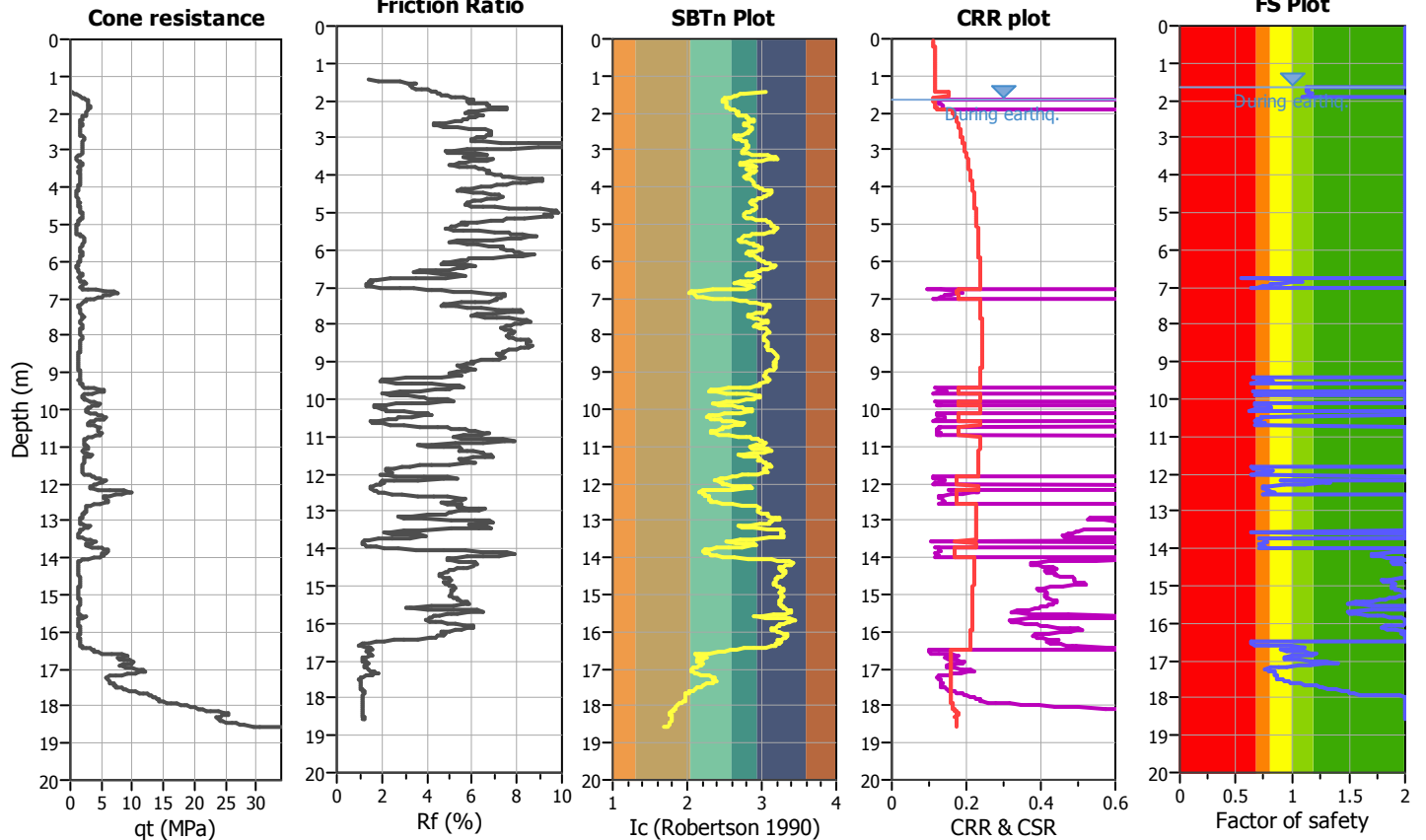
**Project title :**

**Location :**

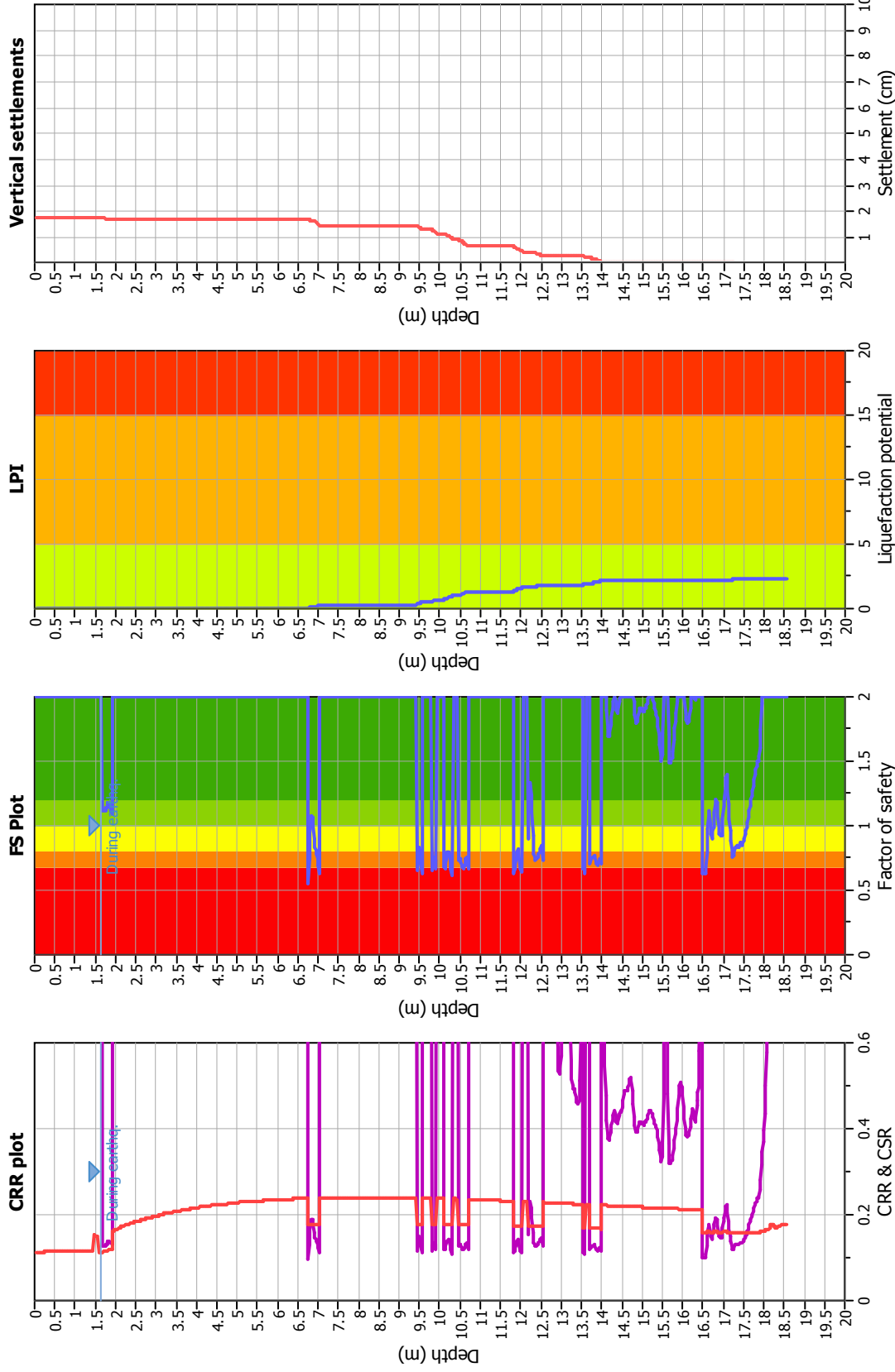
**CPT file : P276CPTU316**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	0.74 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.65 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (earthq.):	1.65 m
Fines correction method:	R&W (1998)	Average results interval:	3
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT
Peak ground acceleration:	0.27	Use fill:	No
Depth to water table (insitu):	0.74 m	Fill height:	N/A
		Fill weight:	N/A
		Transition detect. applied:	No
		$K_s$ applied:	Yes
		Clay like behavior applied:	Sand & Clay
		Limit depth applied:	Yes
		Limit depth:	20.00 m

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

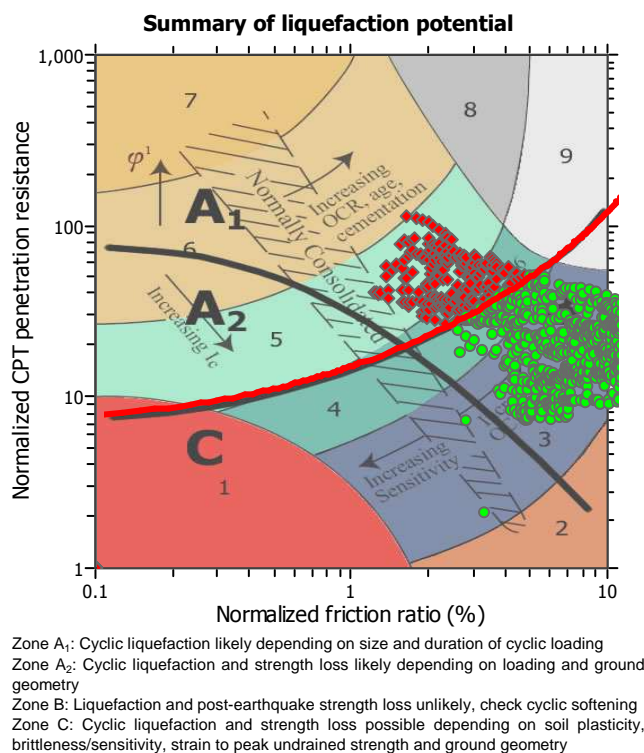
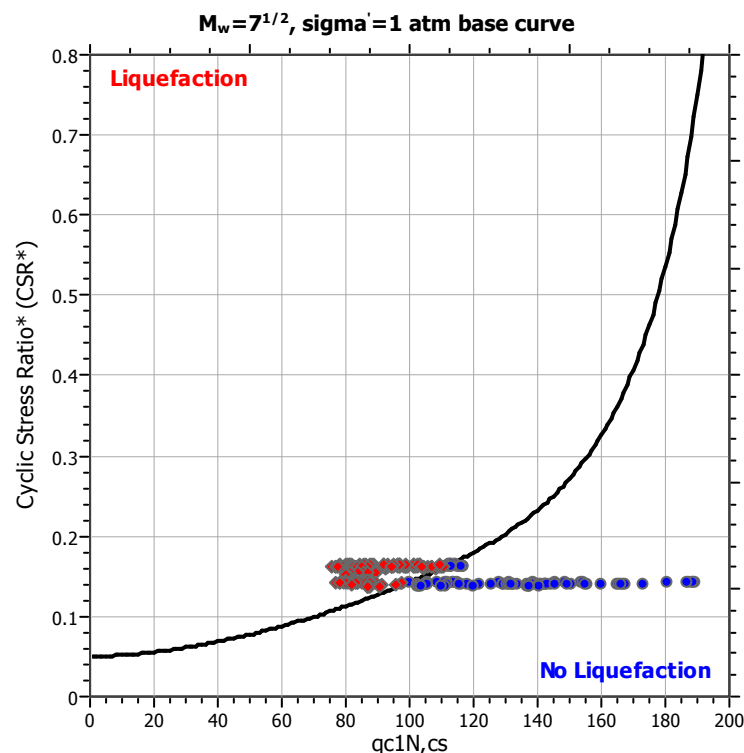
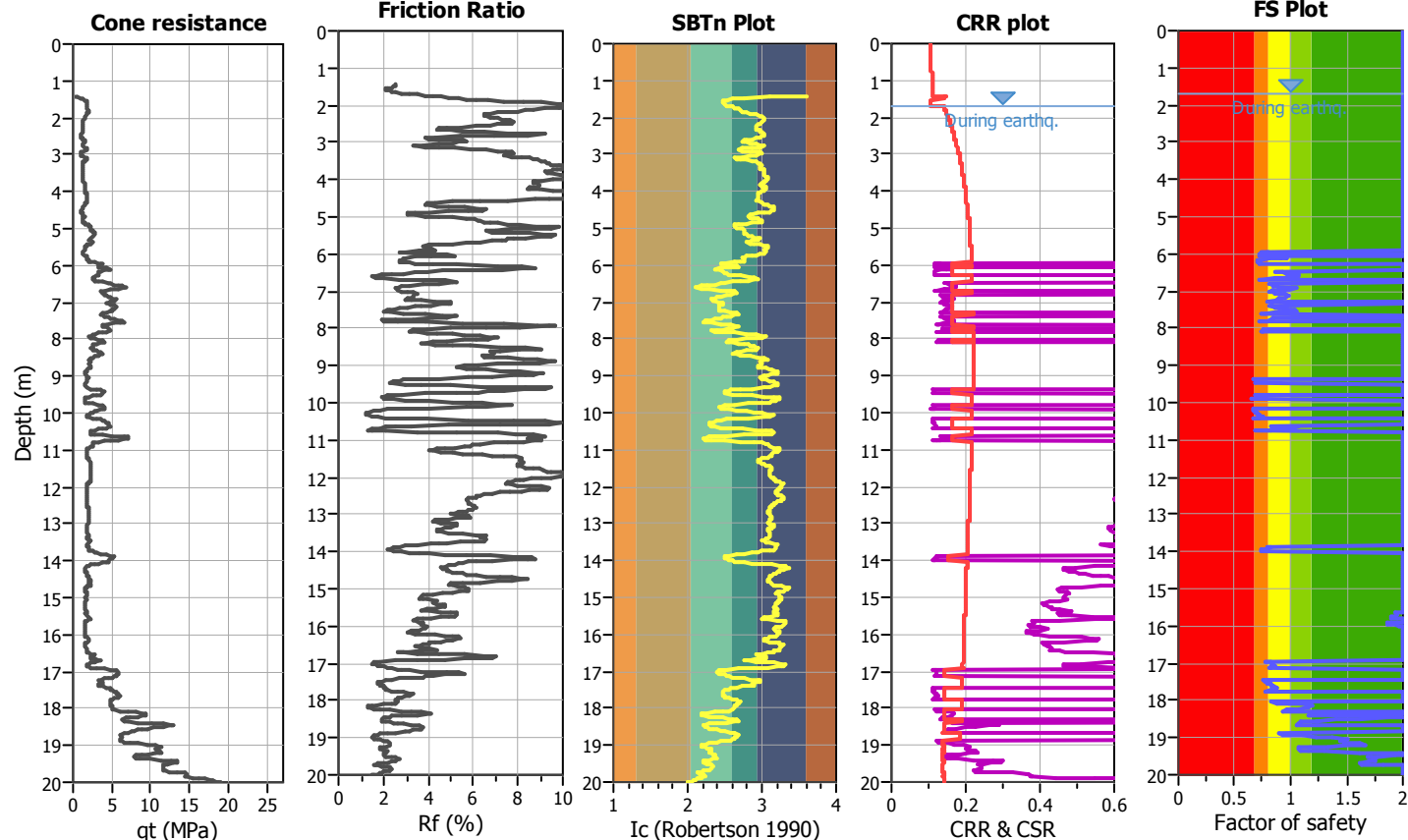
**Project title :**

**Location :**

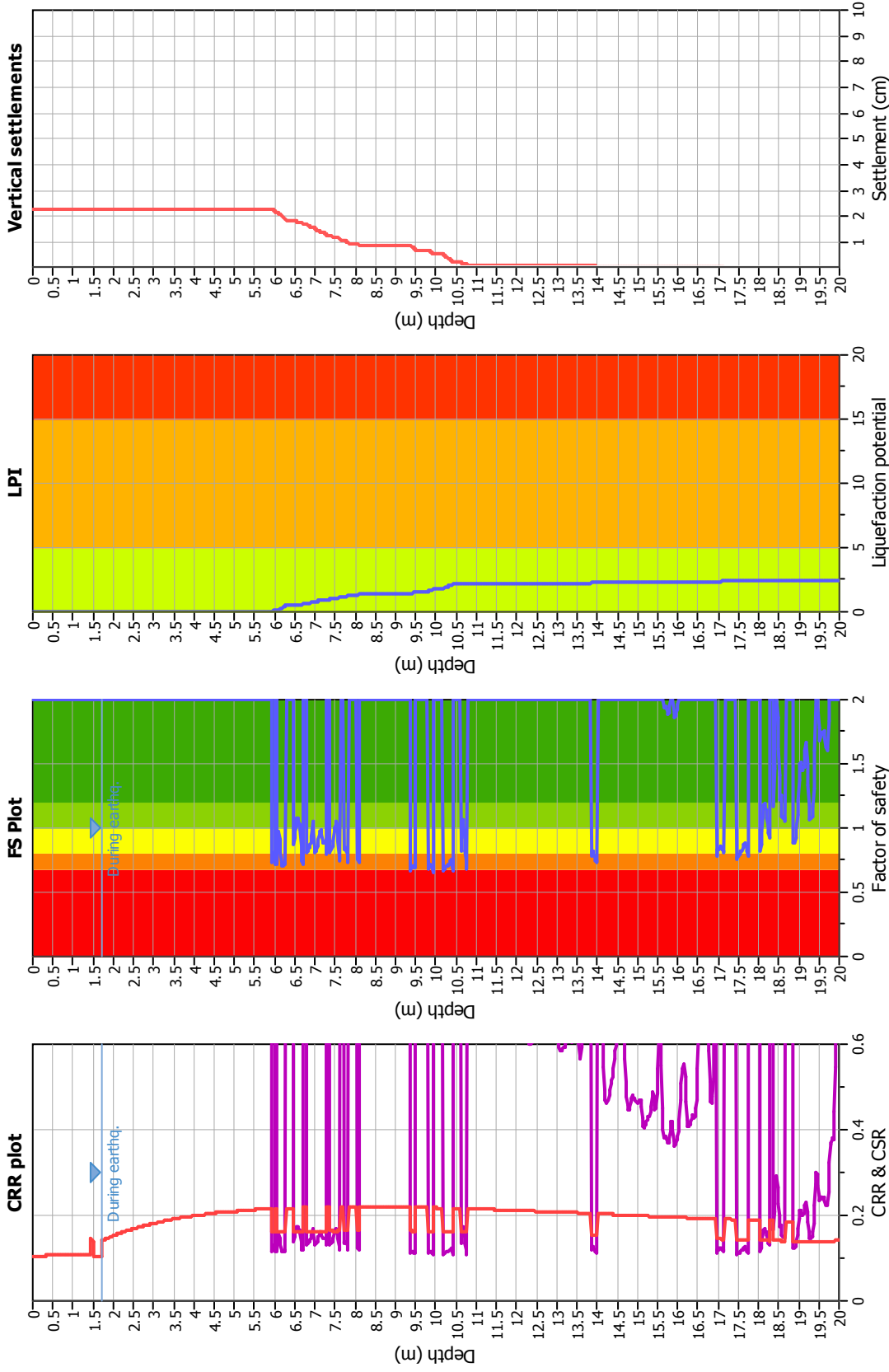
**CPT file : P277CPTU317**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.65 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.70 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



## Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.25  
 Depth to water table (insitu): 1.65 m

Depth to GWT (earthq.): 1.70 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 $K_0$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

### F.S. color scheme

Red: Almost certain it will liquefy  
 Orange: Very likely to liquefy  
 Yellow: Liquefaction and no liq. are equally likely  
 Green: Unlikely to liquefy  
 Dark Green: Almost certain it will not liquefy

### LPI color scheme

Red: Very high risk  
 Orange: High risk  
 Yellow: Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

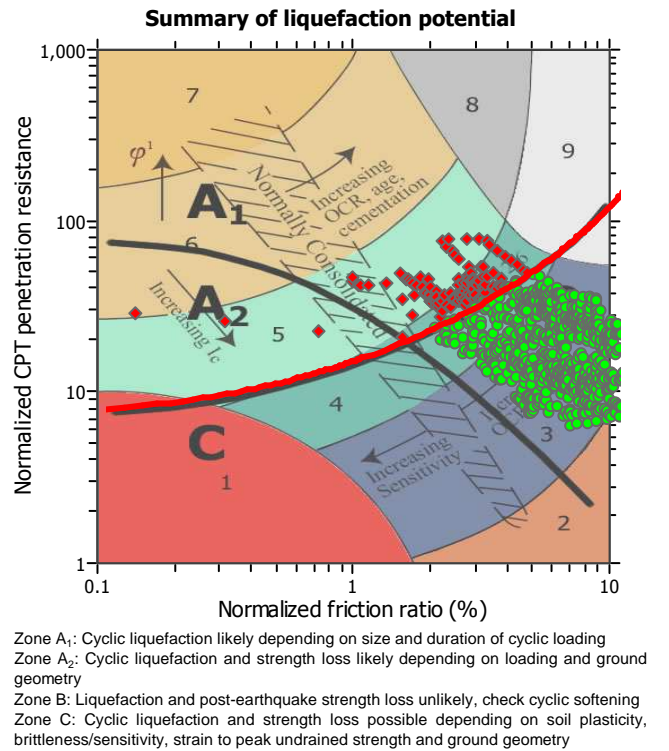
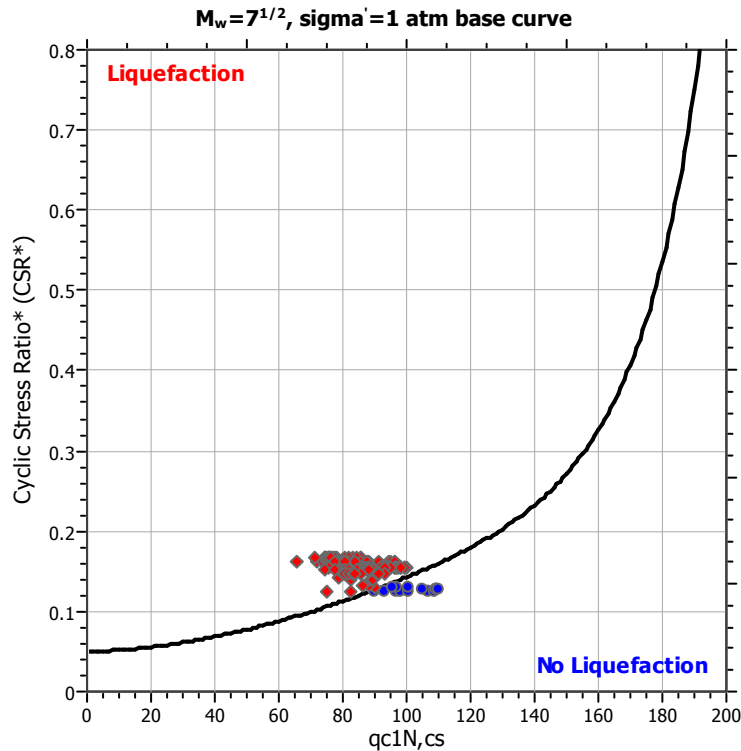
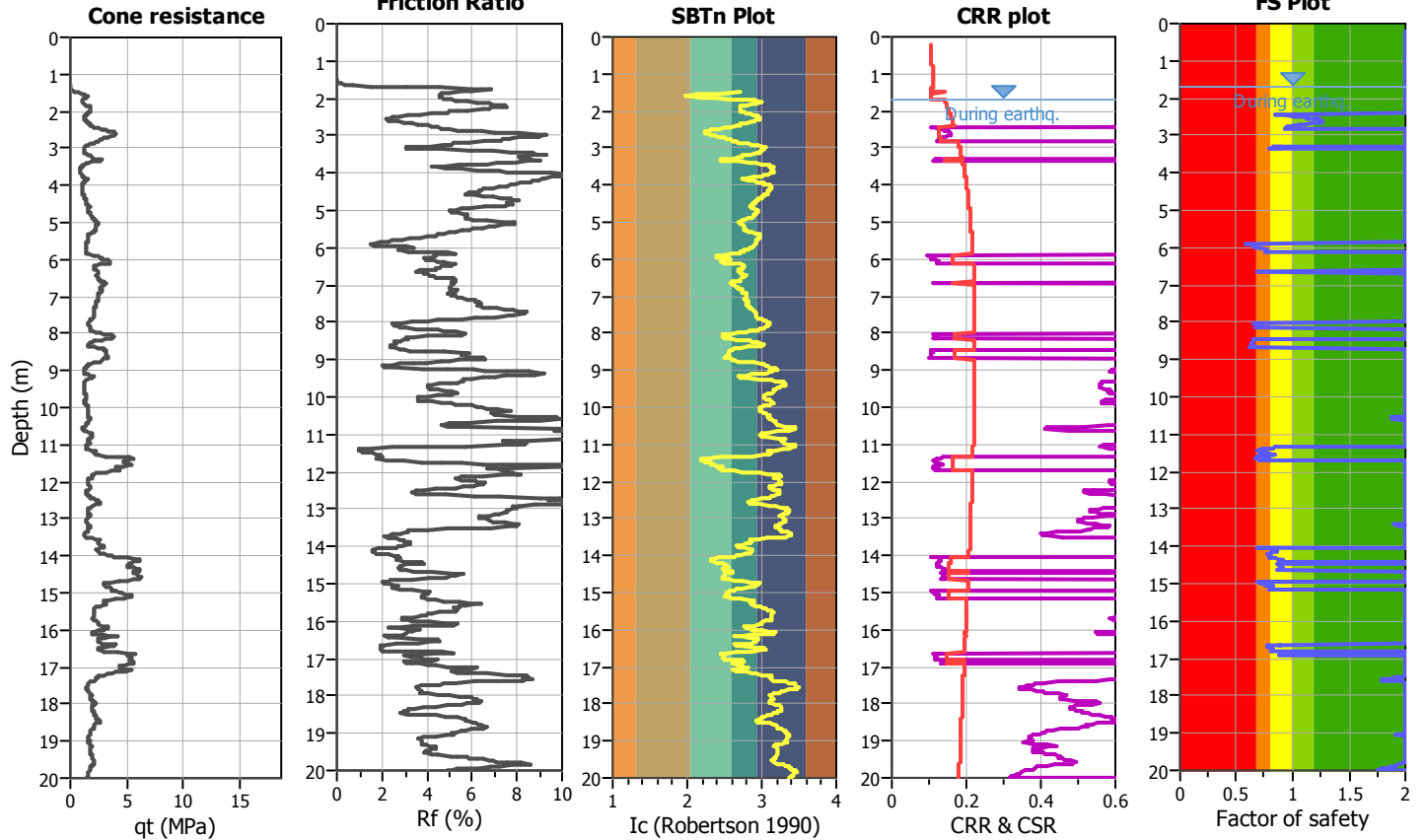
**Project title :**

**Location :**

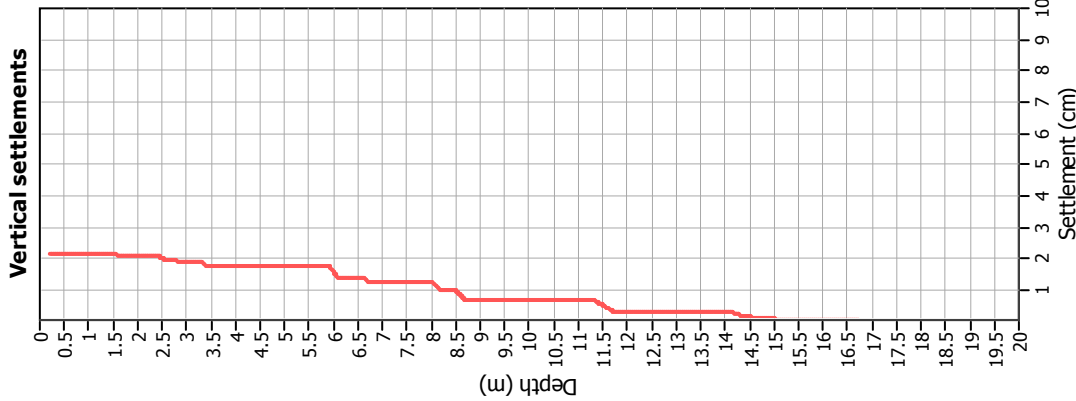
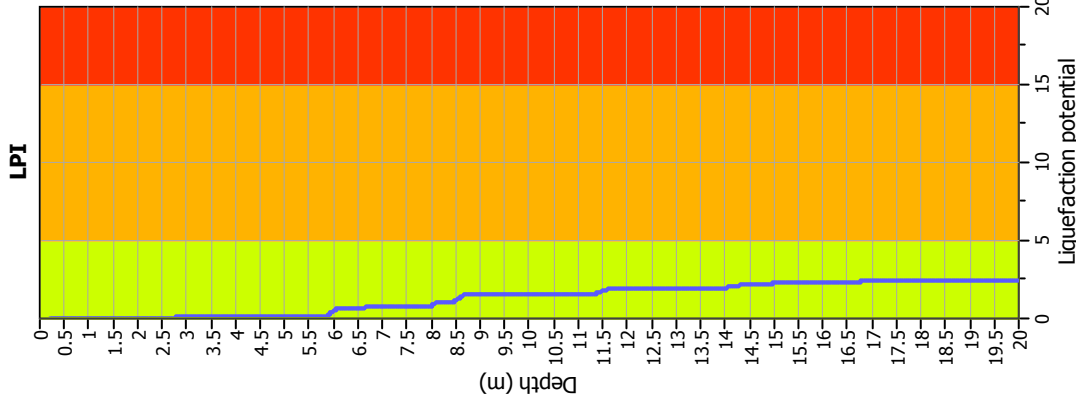
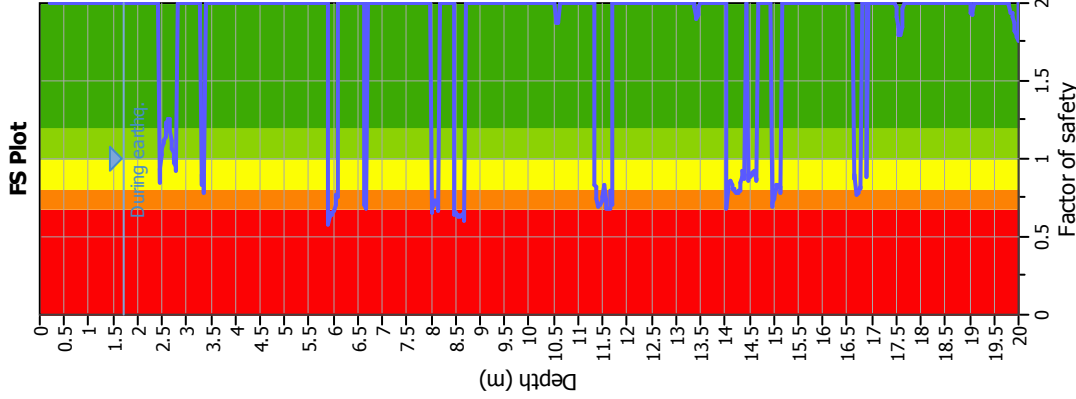
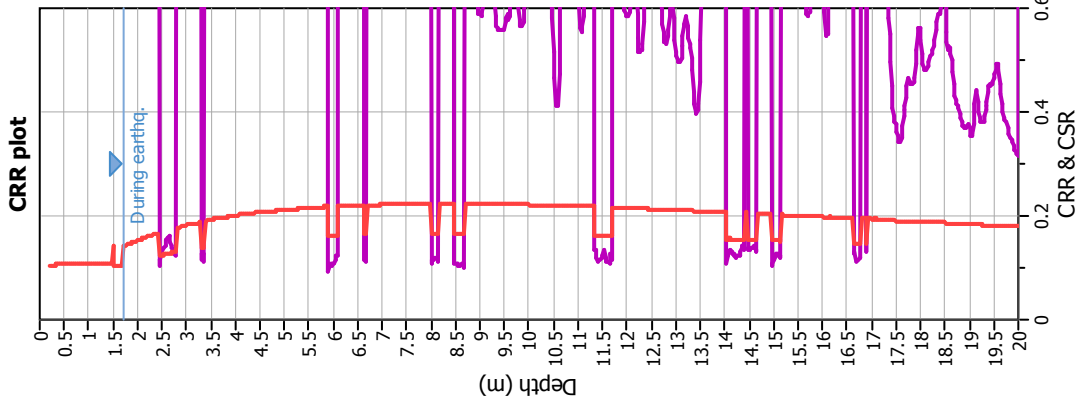
**CPT file : P278CPTU318**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.45 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.70 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.25  
 Depth to water table (insitu): 1.45 m

Depth to GWT (earthq.): 1.70 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

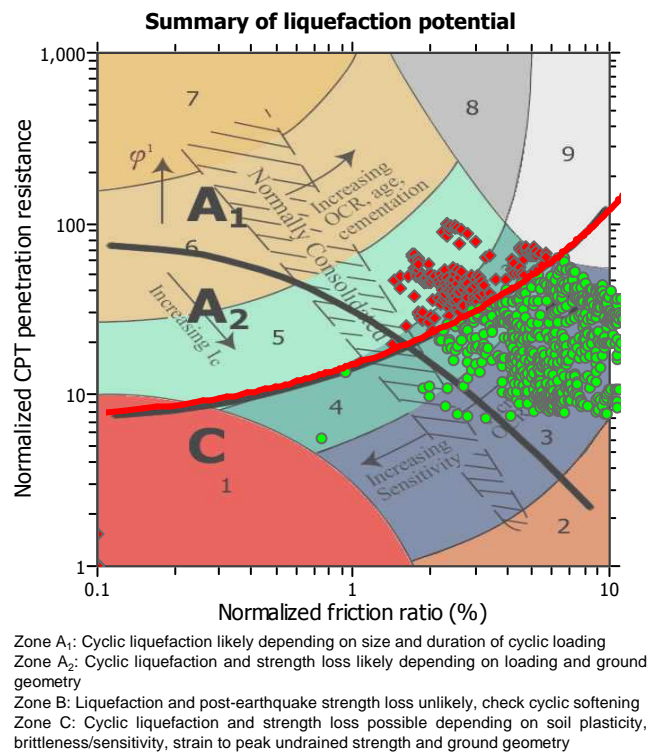
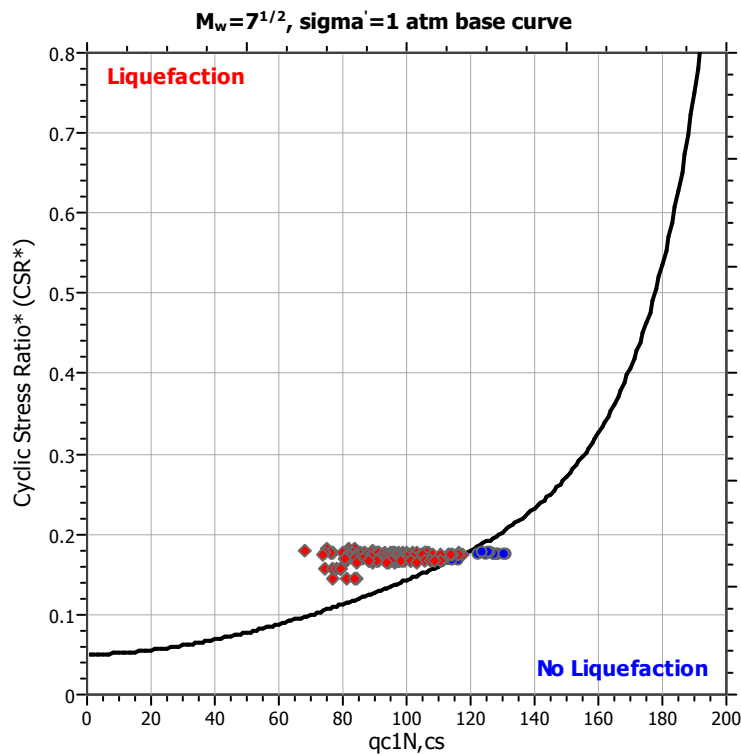
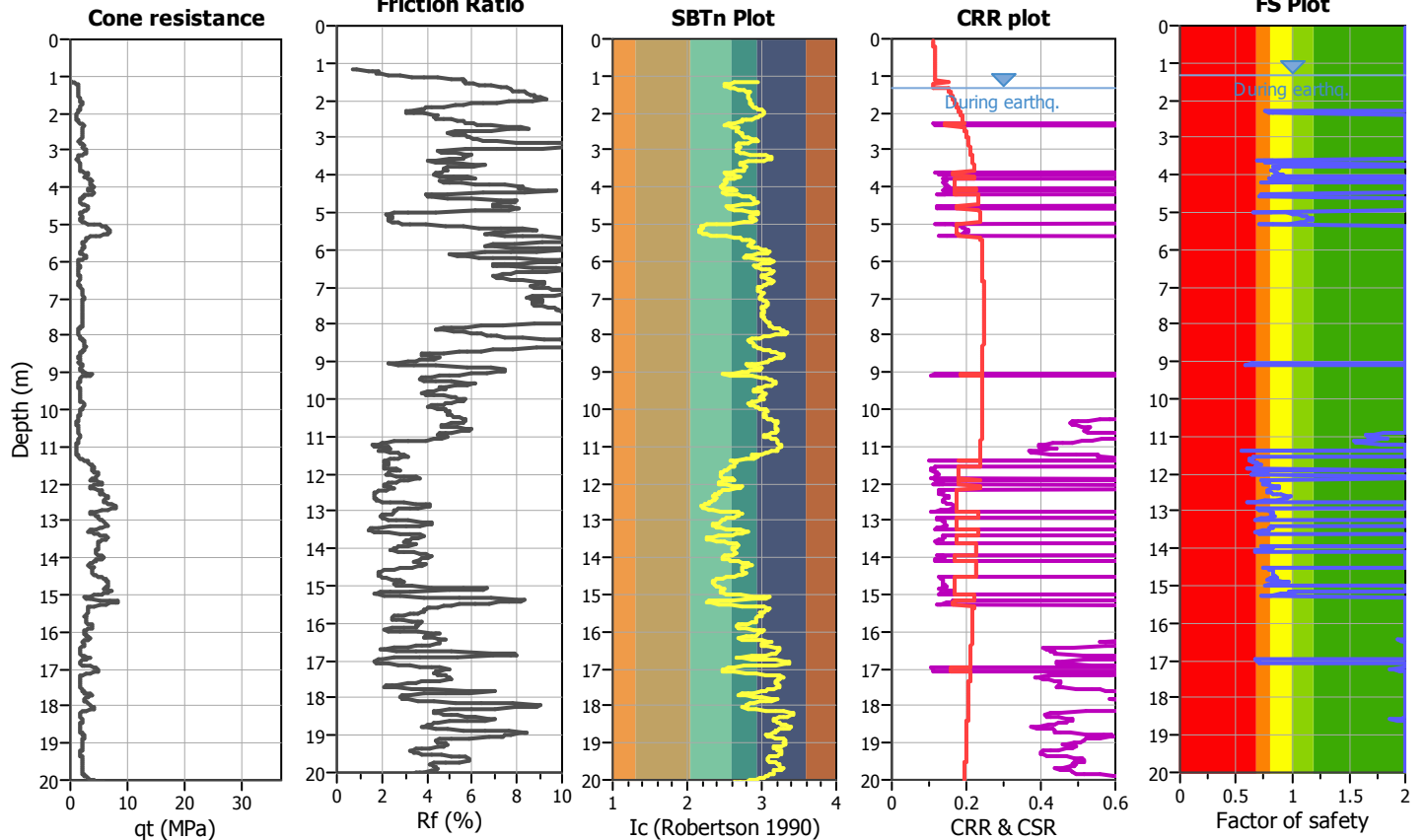
**Project title :**

**Location :**

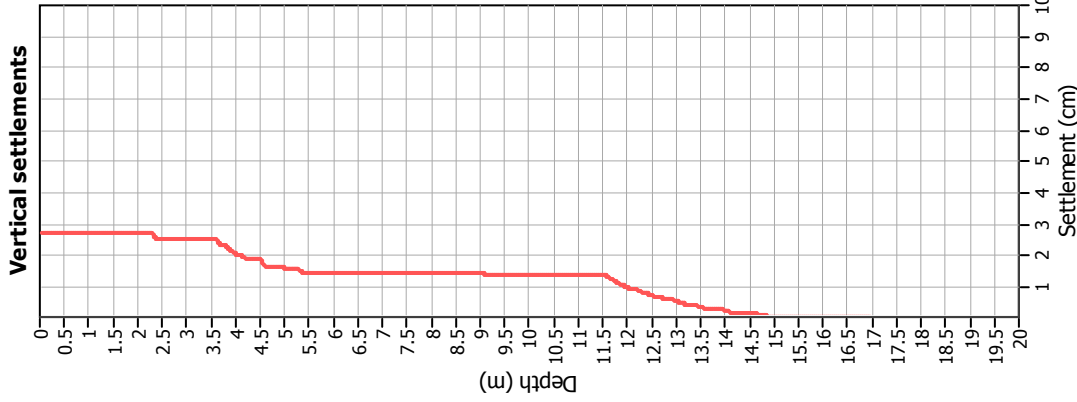
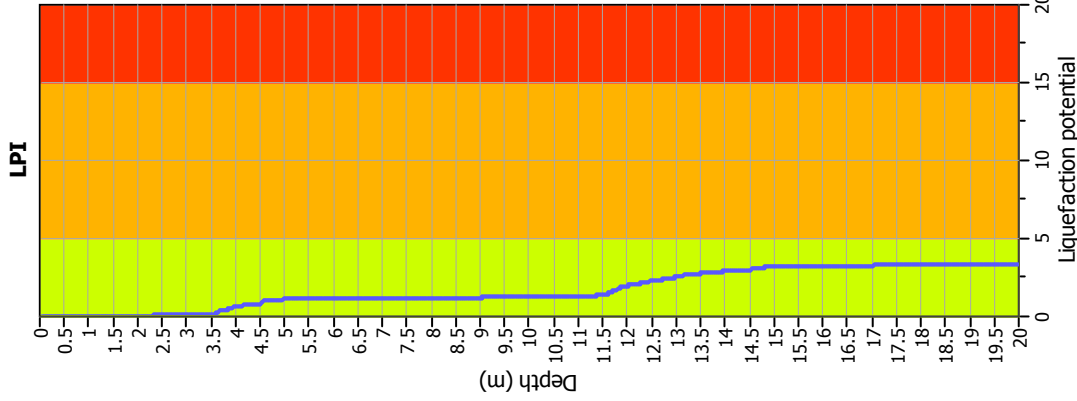
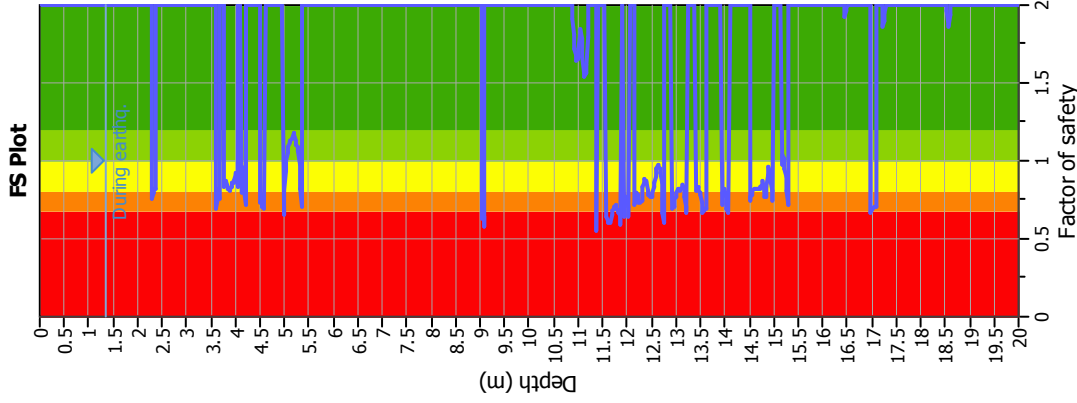
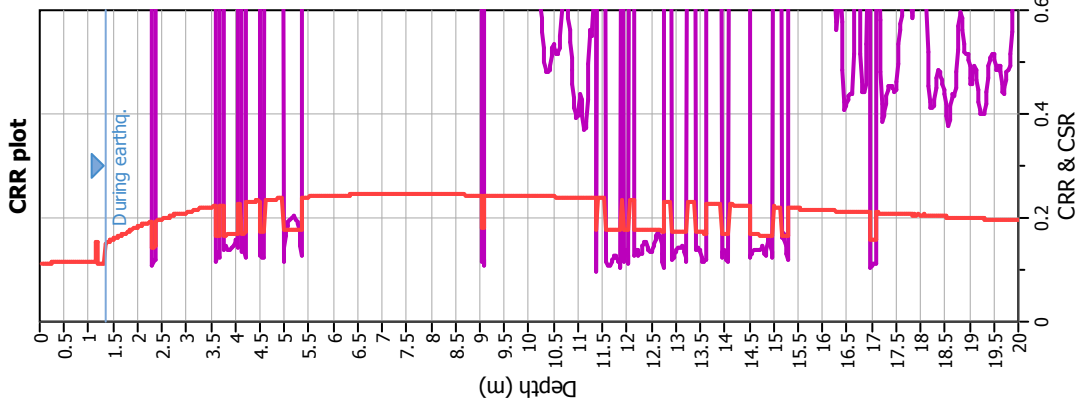
**CPT file : P279CPTU319**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.25 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.35 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.25 m

Depth to GWT (earthq.): 1.35 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

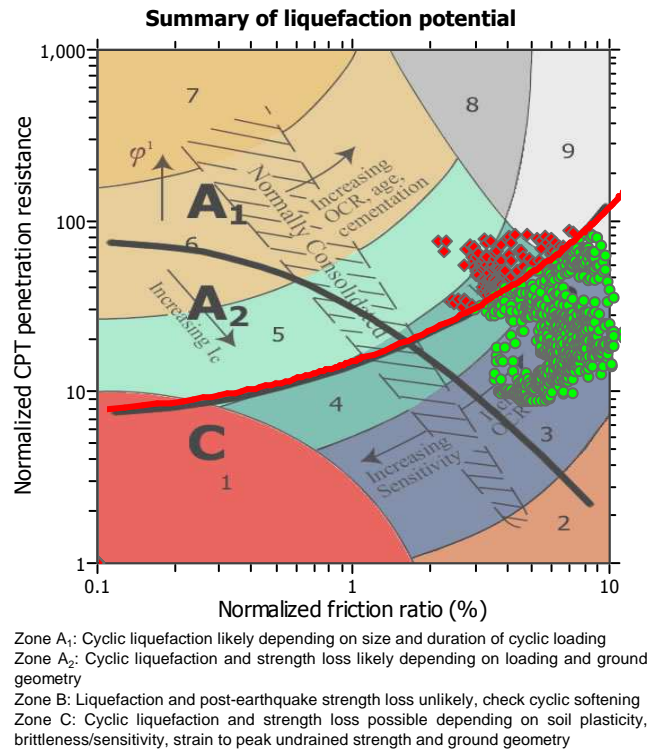
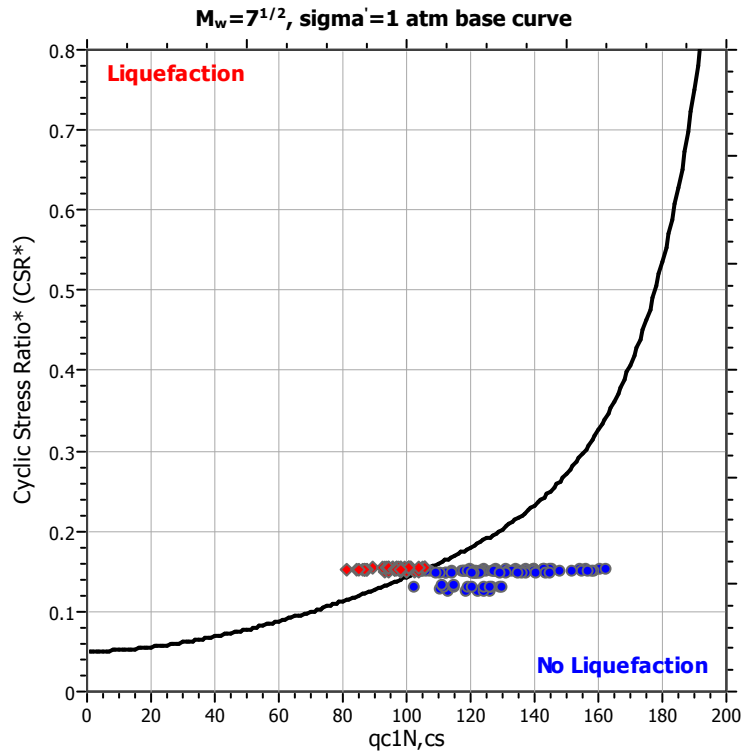
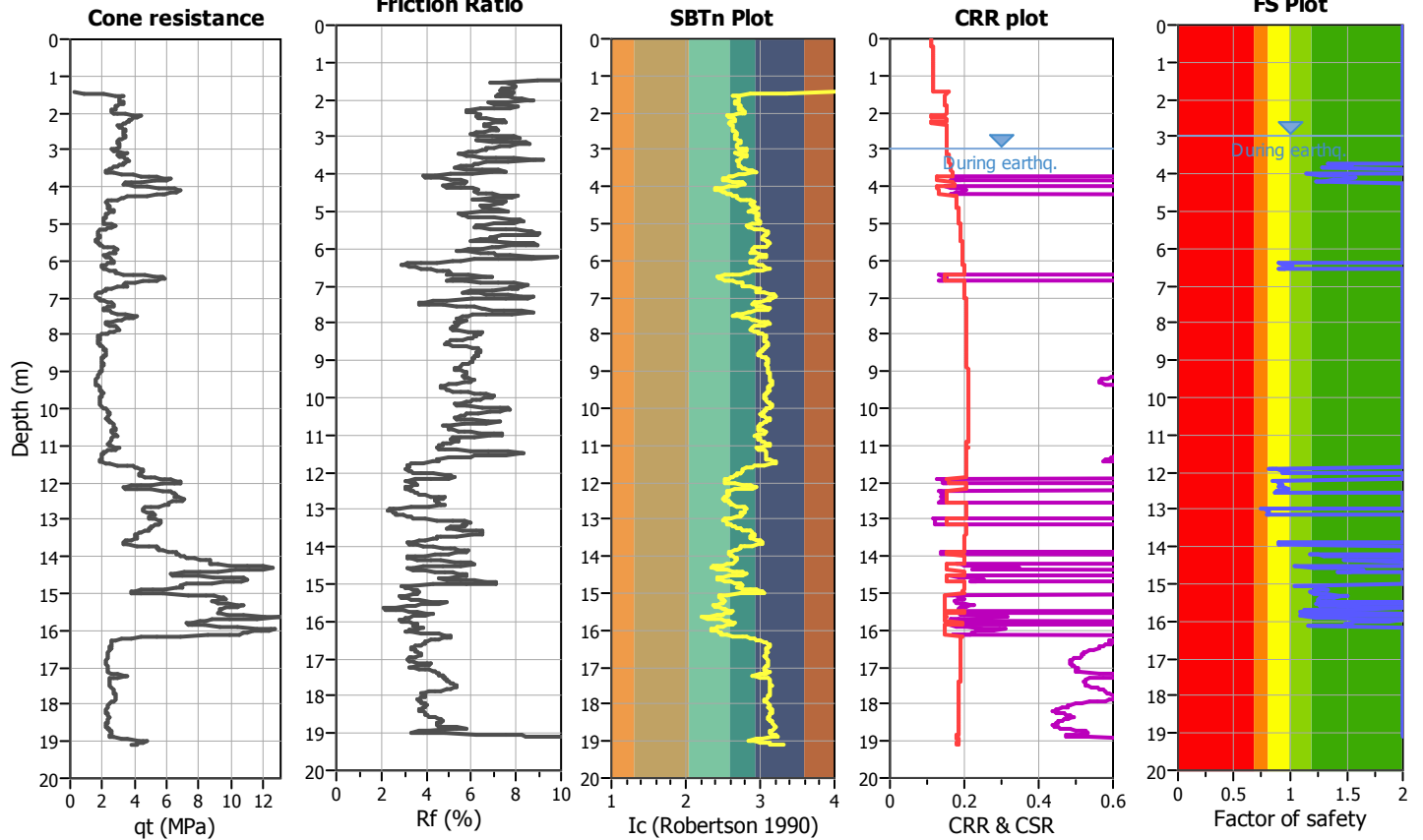
**Project title :**

**Location :**

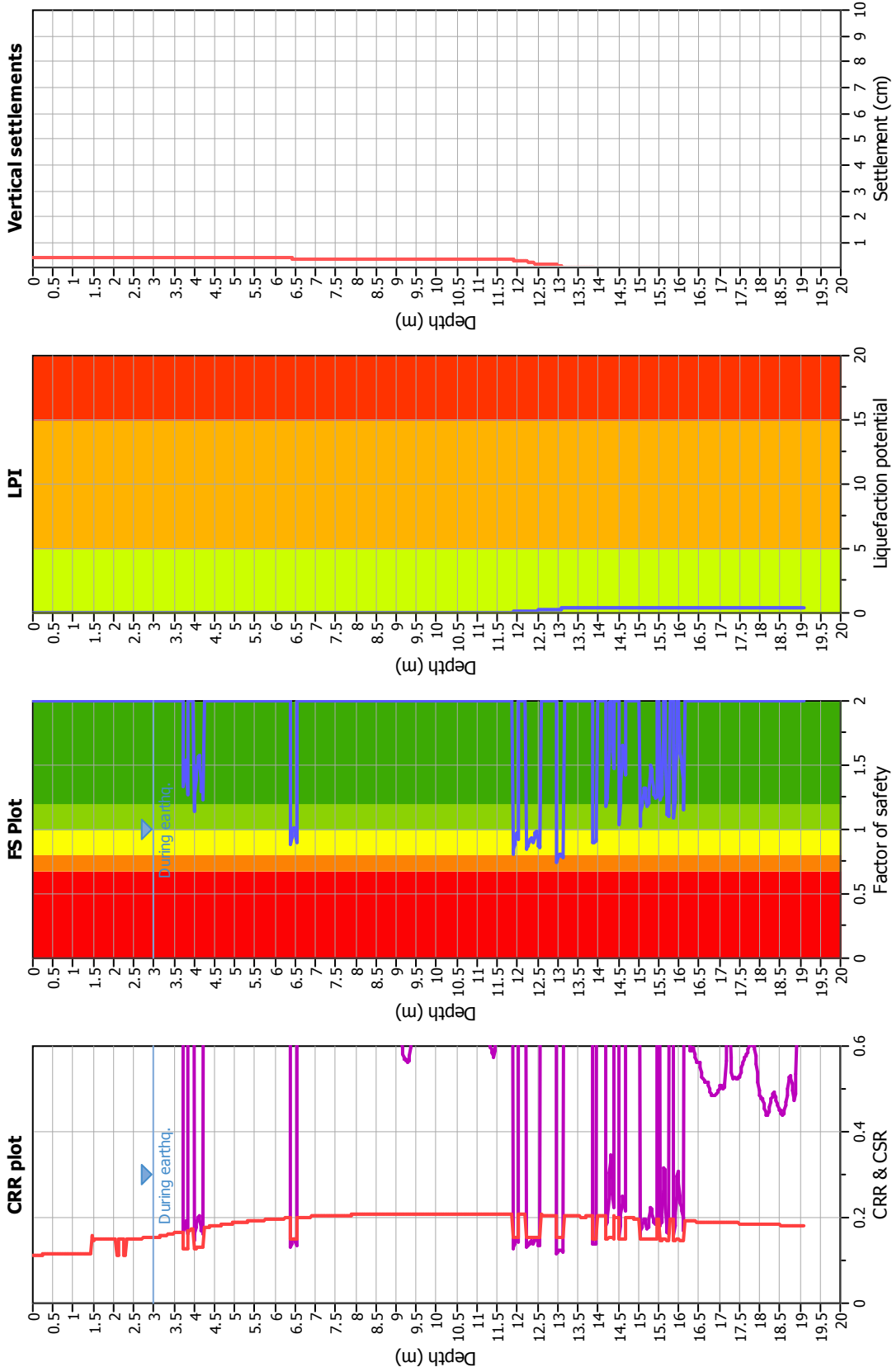
**CPT file : P280CPTU320**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	4.25 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	3.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



## Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 4.25 m

Depth to GWT (earthq.): 3.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

### F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

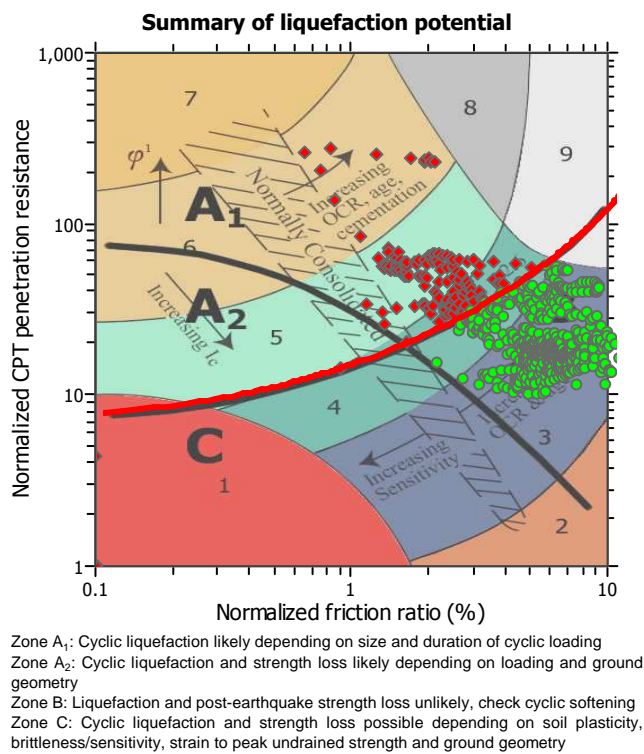
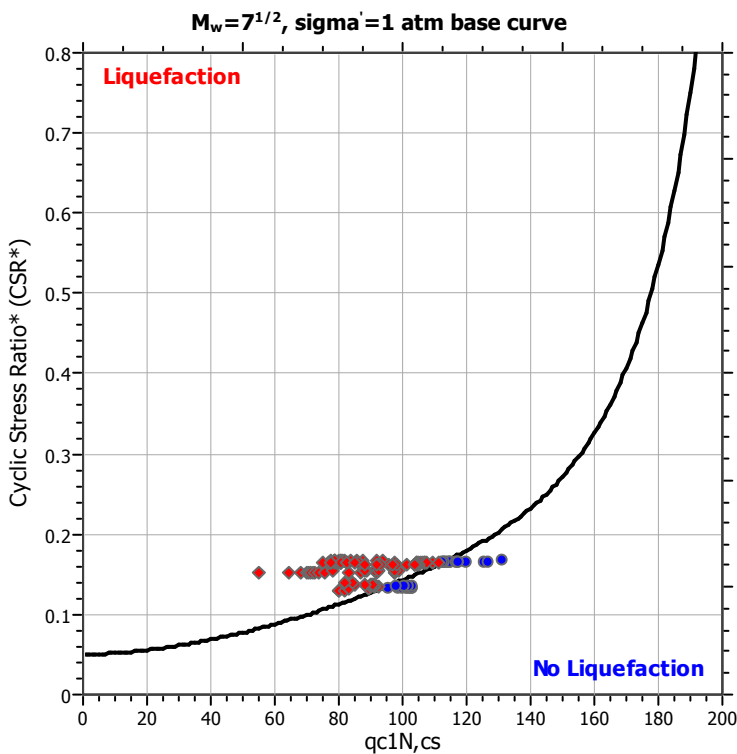
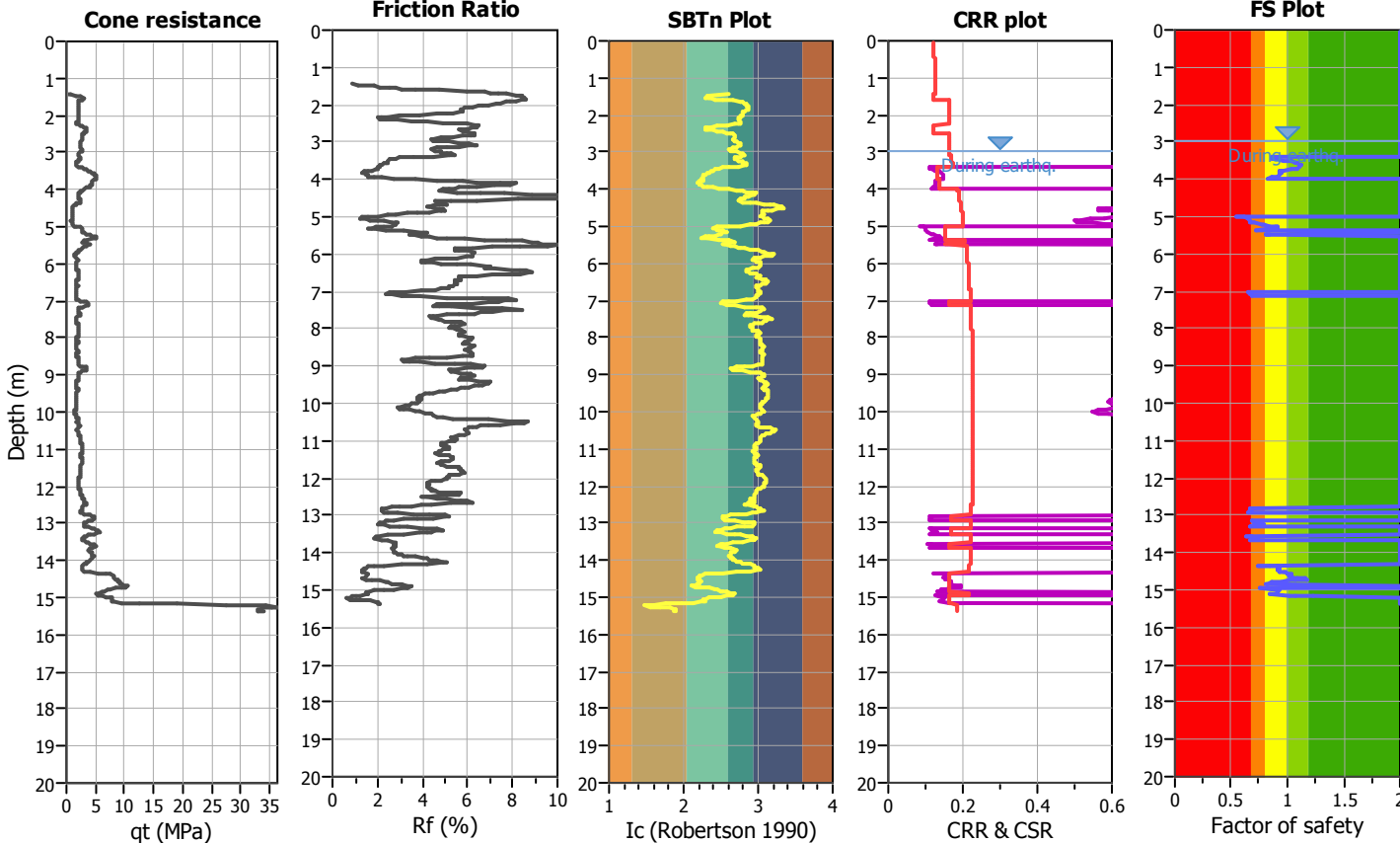
**Project title :**

**Location :**

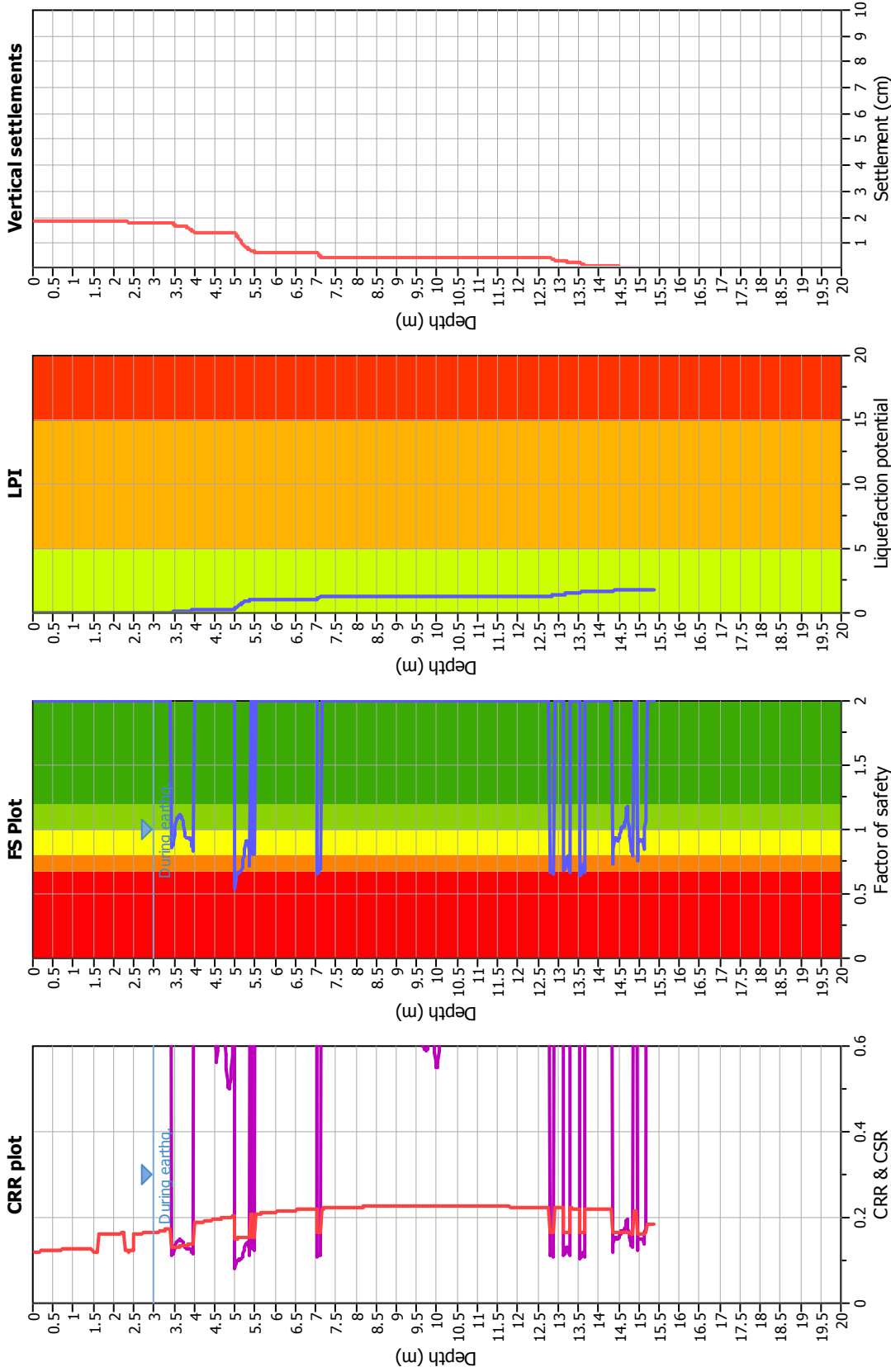
**CPT file : P281CPTU321**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	3.45 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	3.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.29	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.29  
 Depth to water table (insitu): 3.45 m

## F.S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 3.00 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

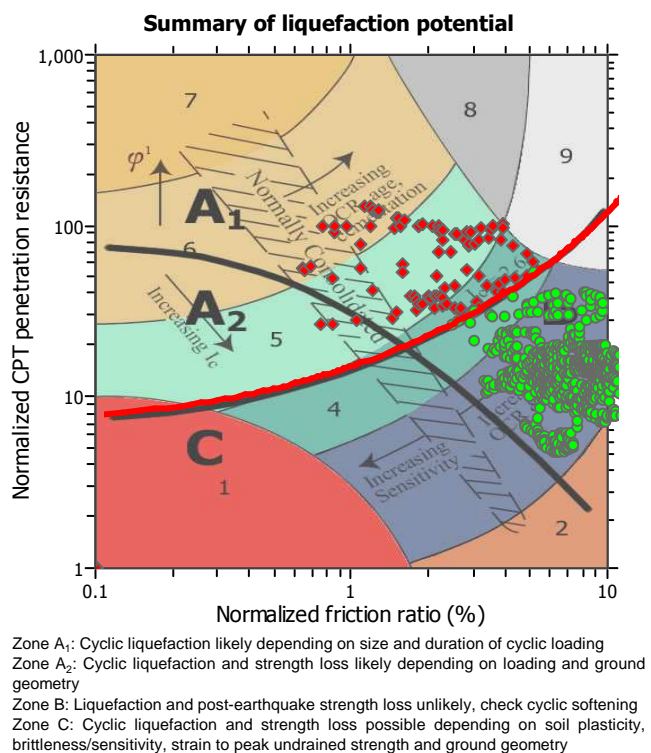
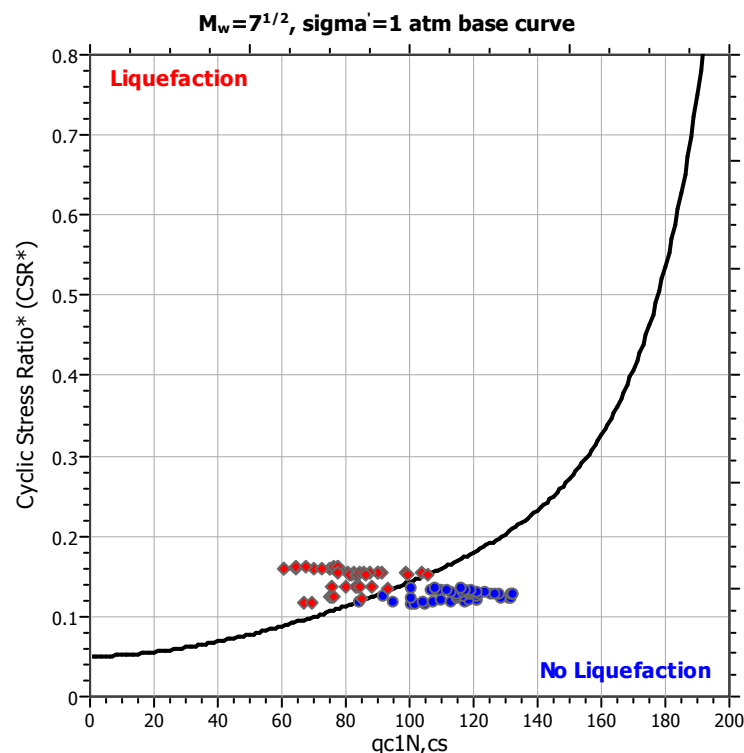
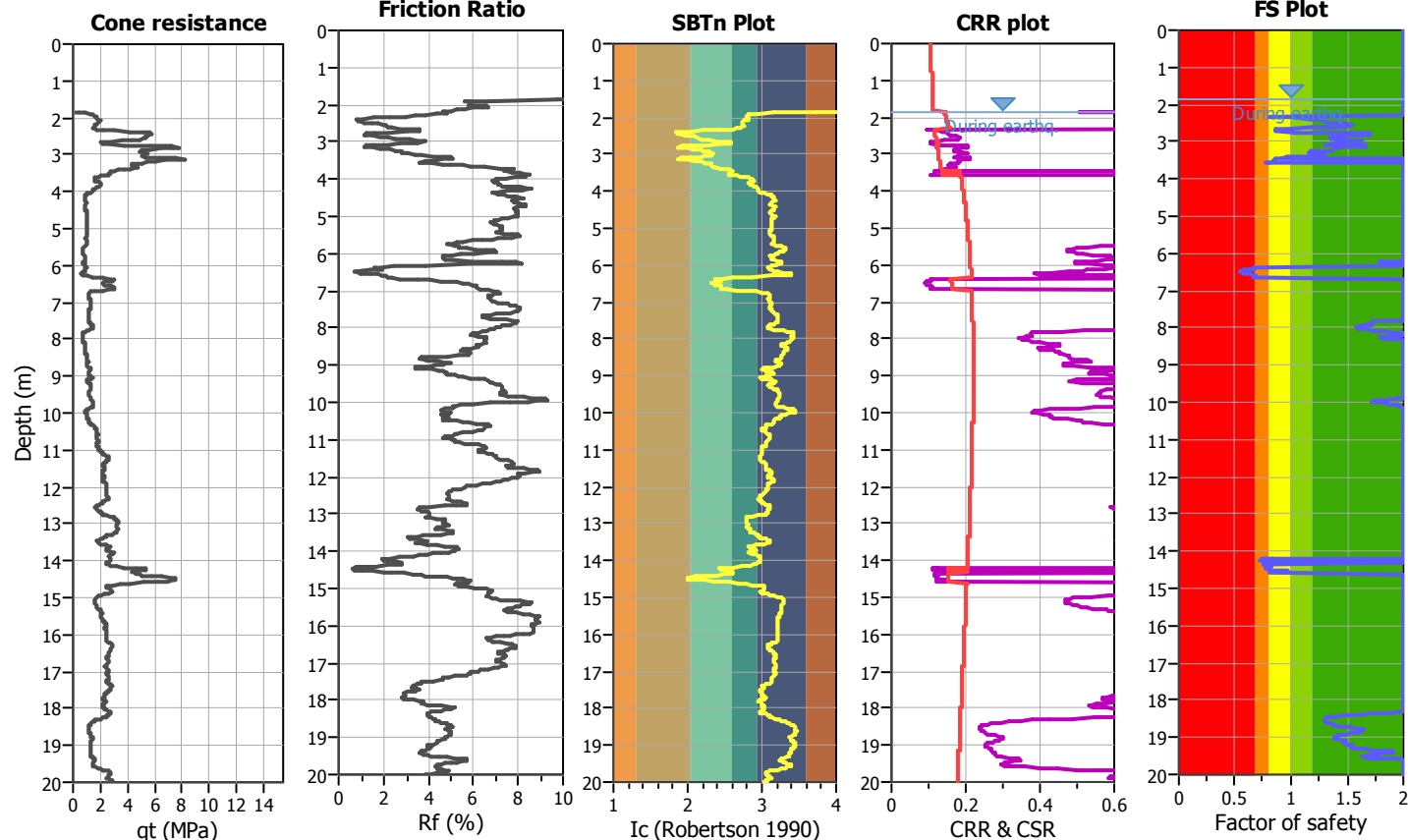
**Project title :**

**Location :**

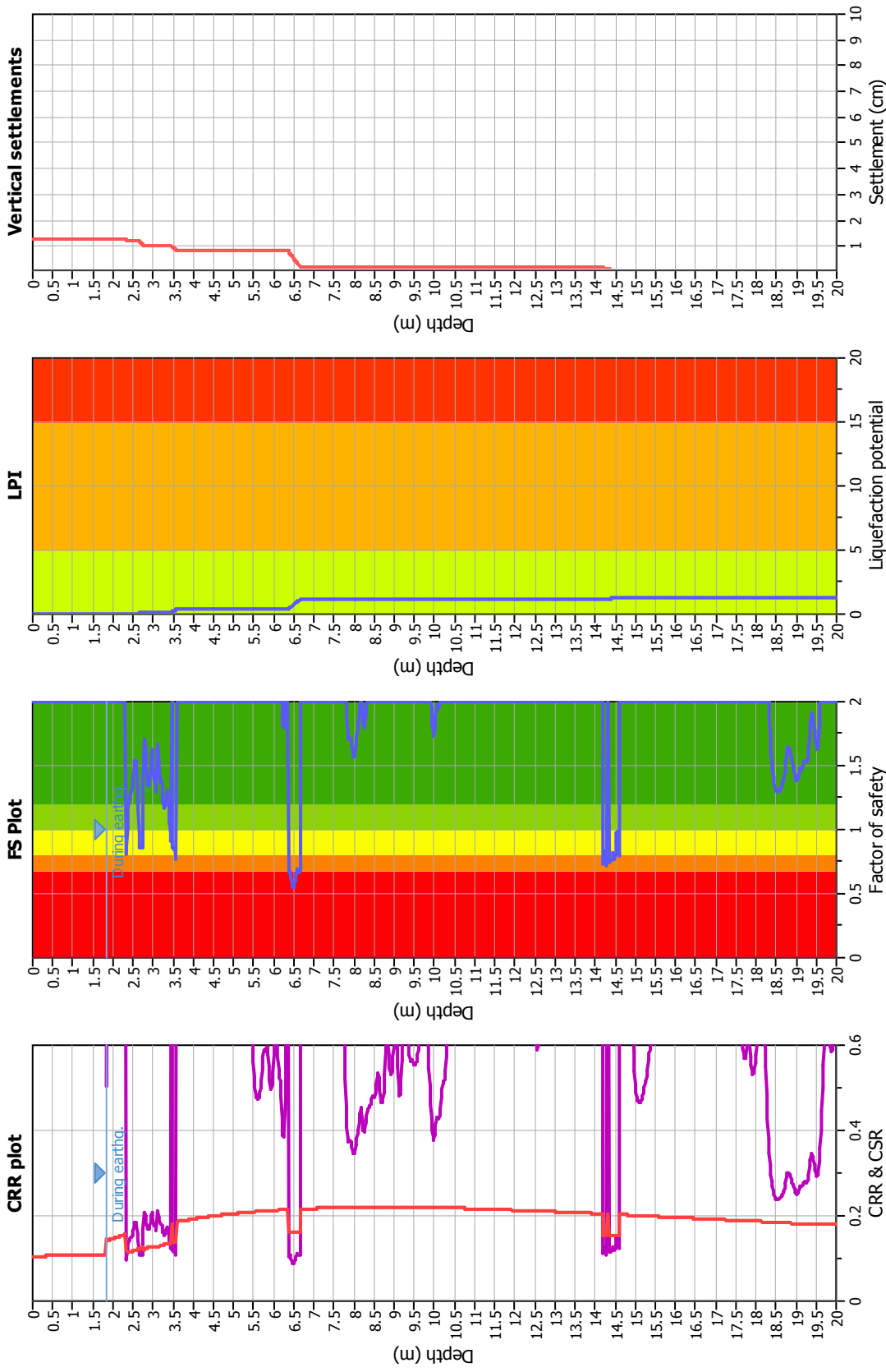
**CPT file : P284CPTU324**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.70 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.85 m	Fill height:	N/A	applied:	Sand & Clay
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.25  
 Depth to water table (insitu): 1.70 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.85 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

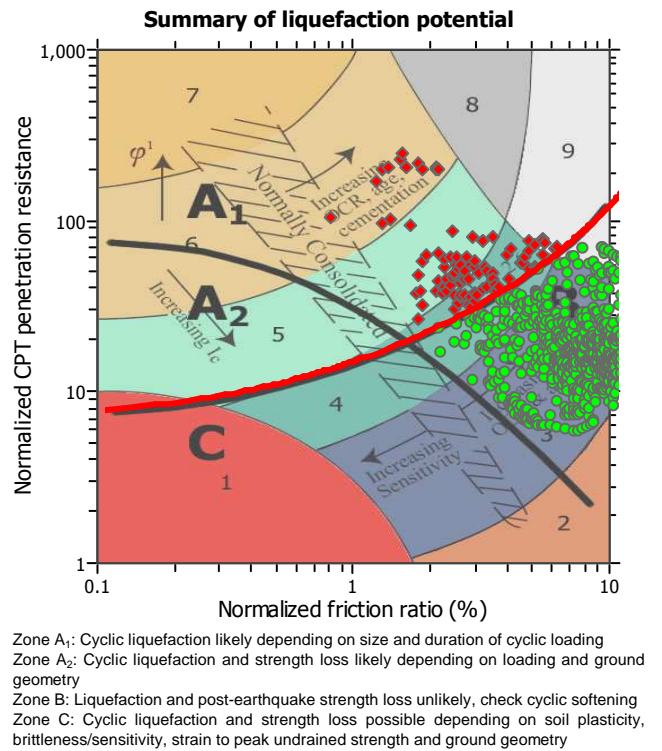
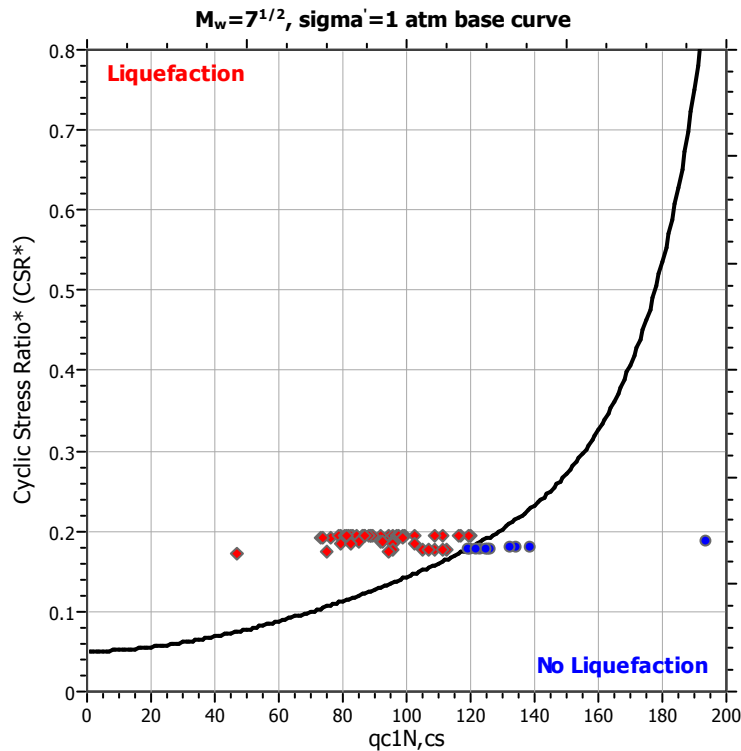
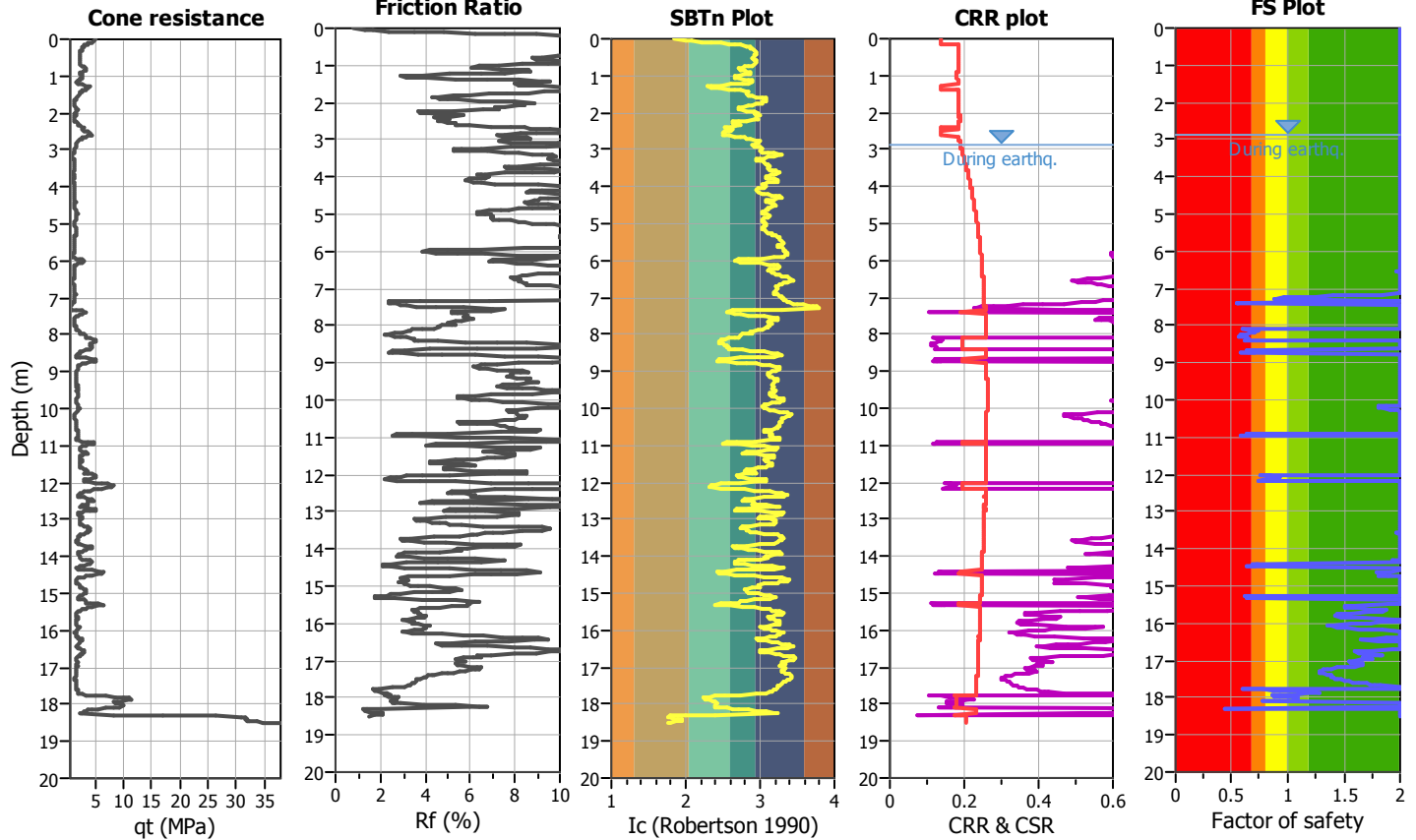
**Project title :**

**Location :**

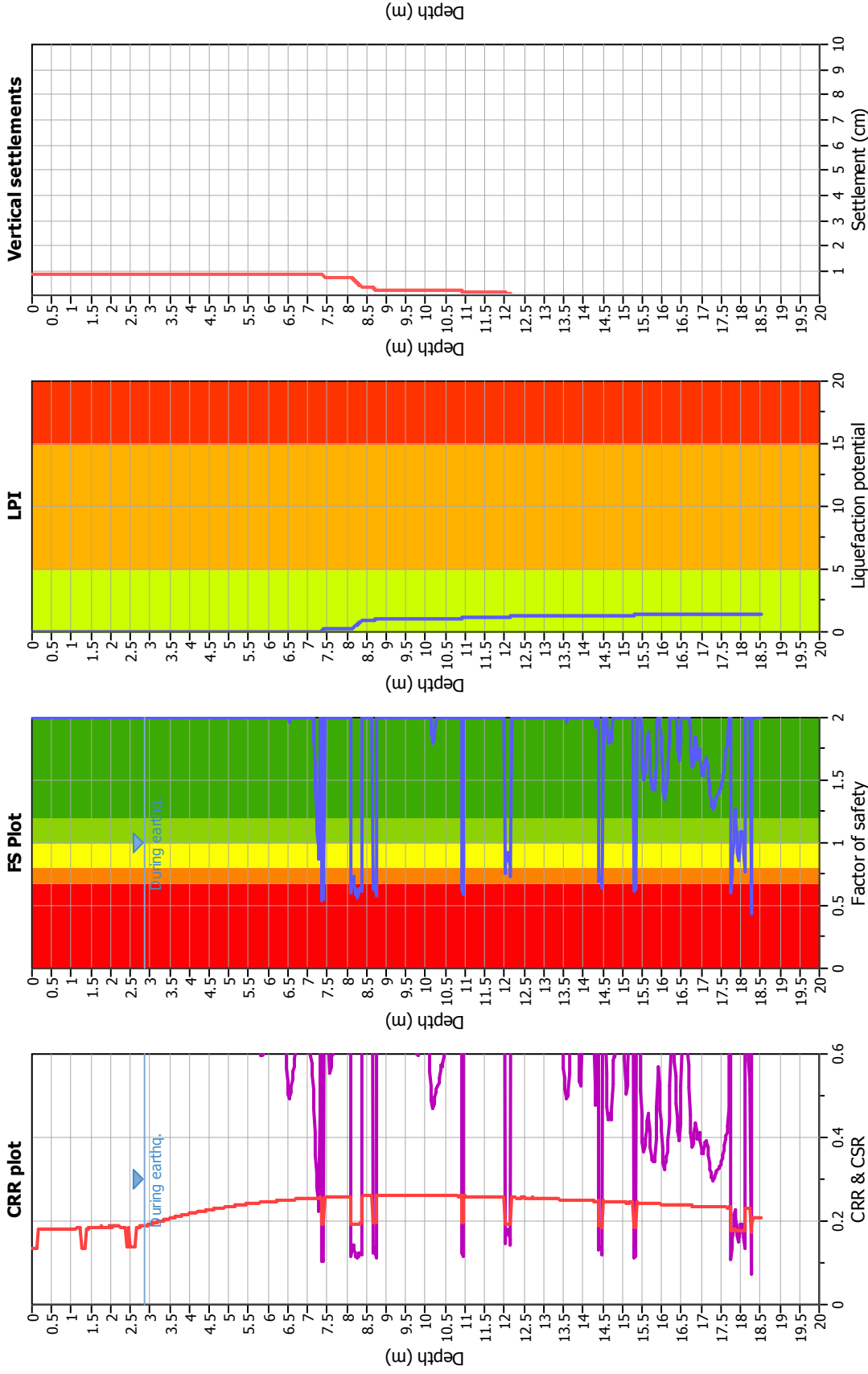
**CPT file : P350CPT390**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.85 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	2.85 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.33	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



## Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.33  
 Depth to water table (insitu): 2.85 m

Depth to GWT (earthq.): 2.85 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

### F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

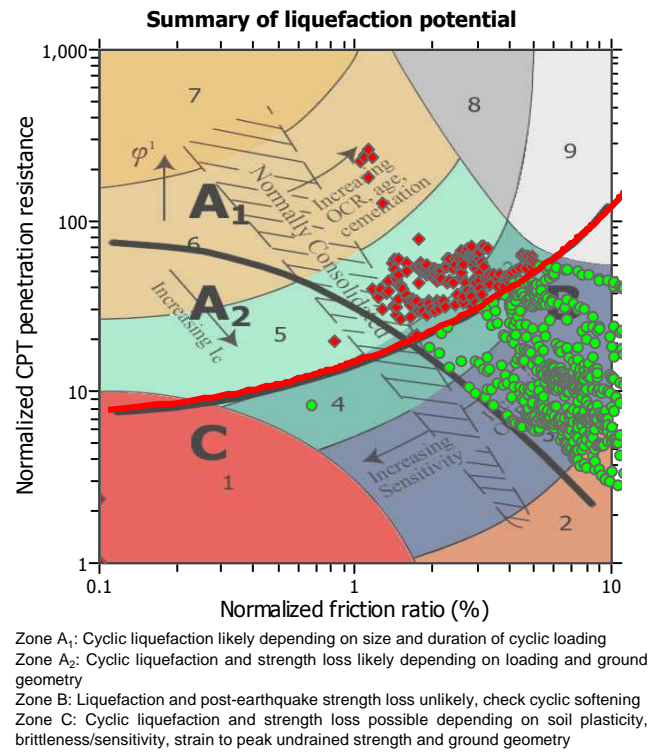
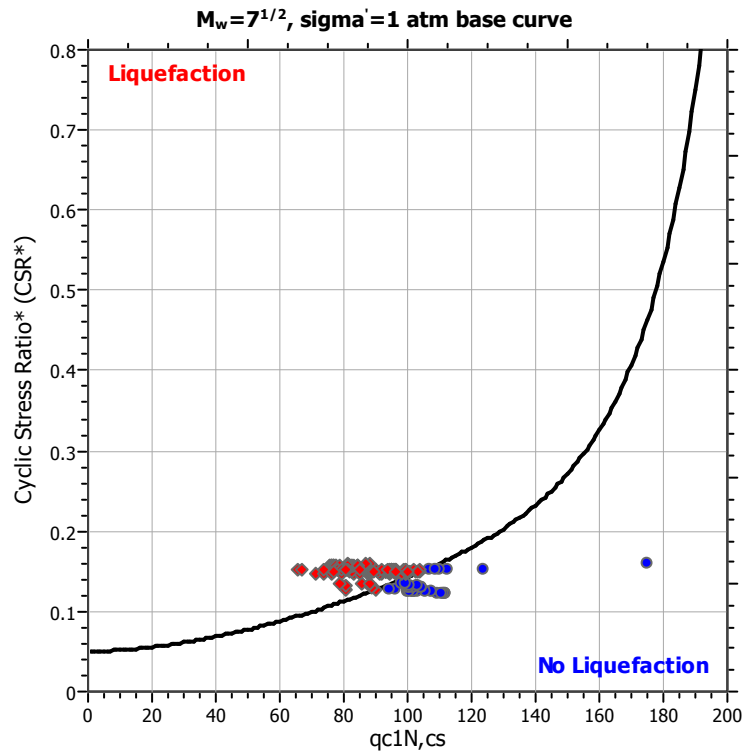
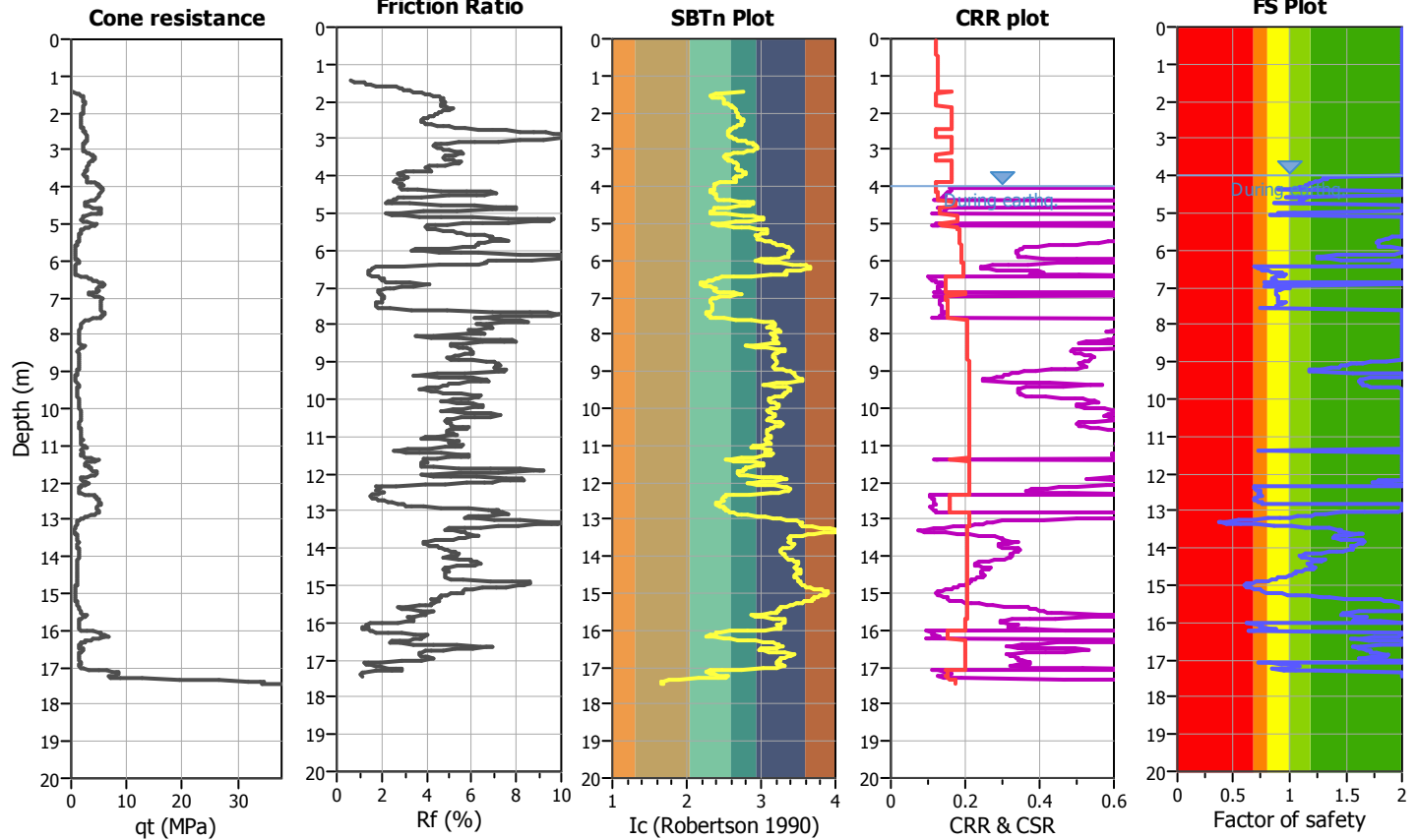
**Project title :**

**Location :**

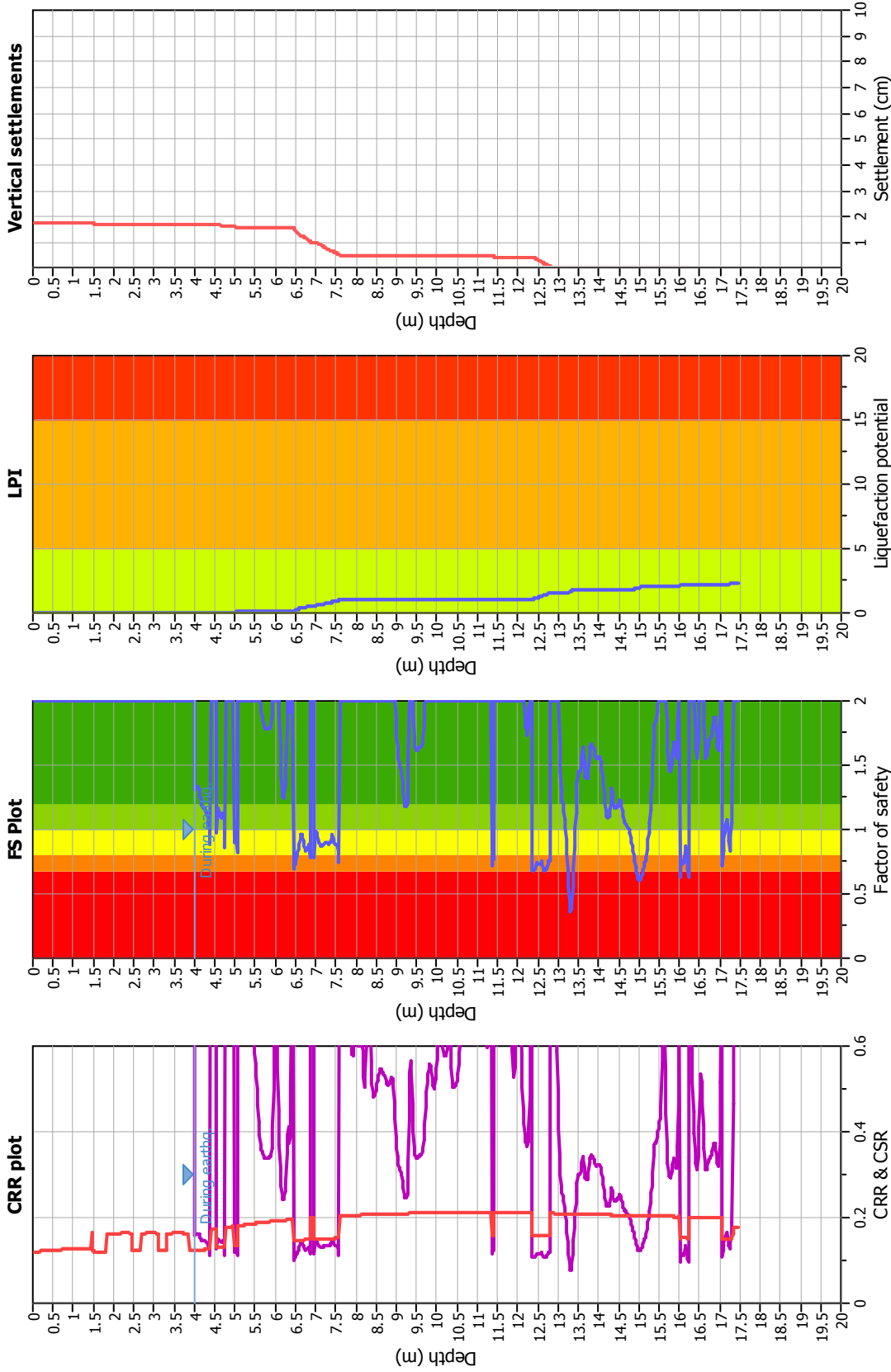
**CPT file : P361CPTU401**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	4.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	4.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.29	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



## Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.29  
 Depth to water table (insitu): 4.00 m

### F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 4.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

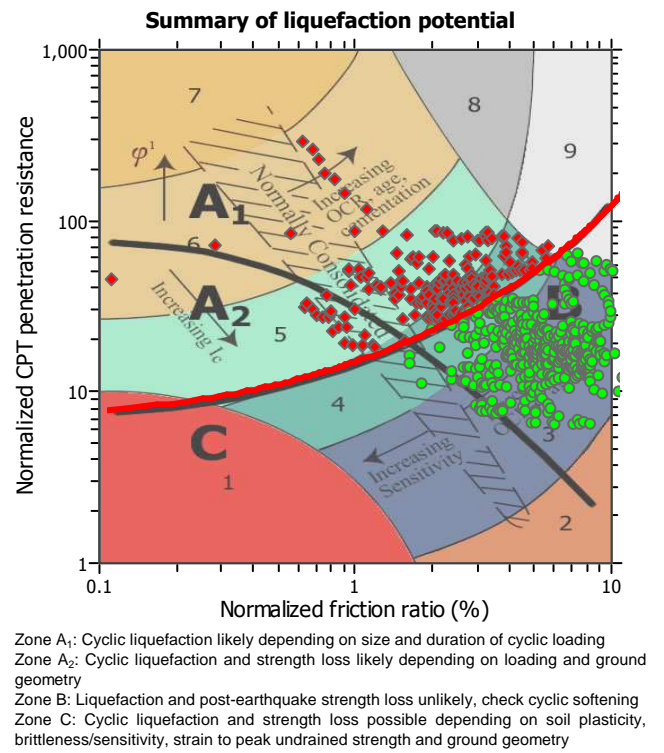
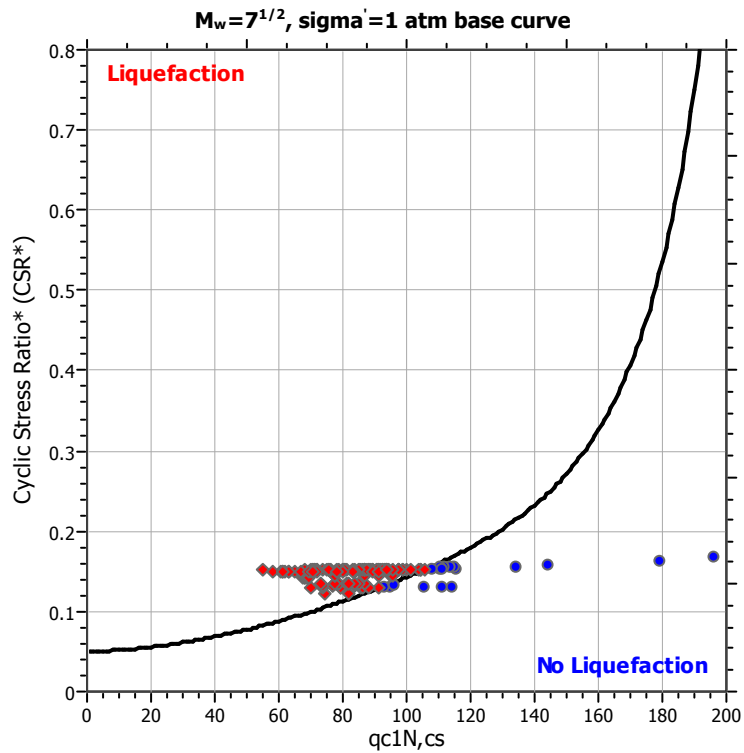
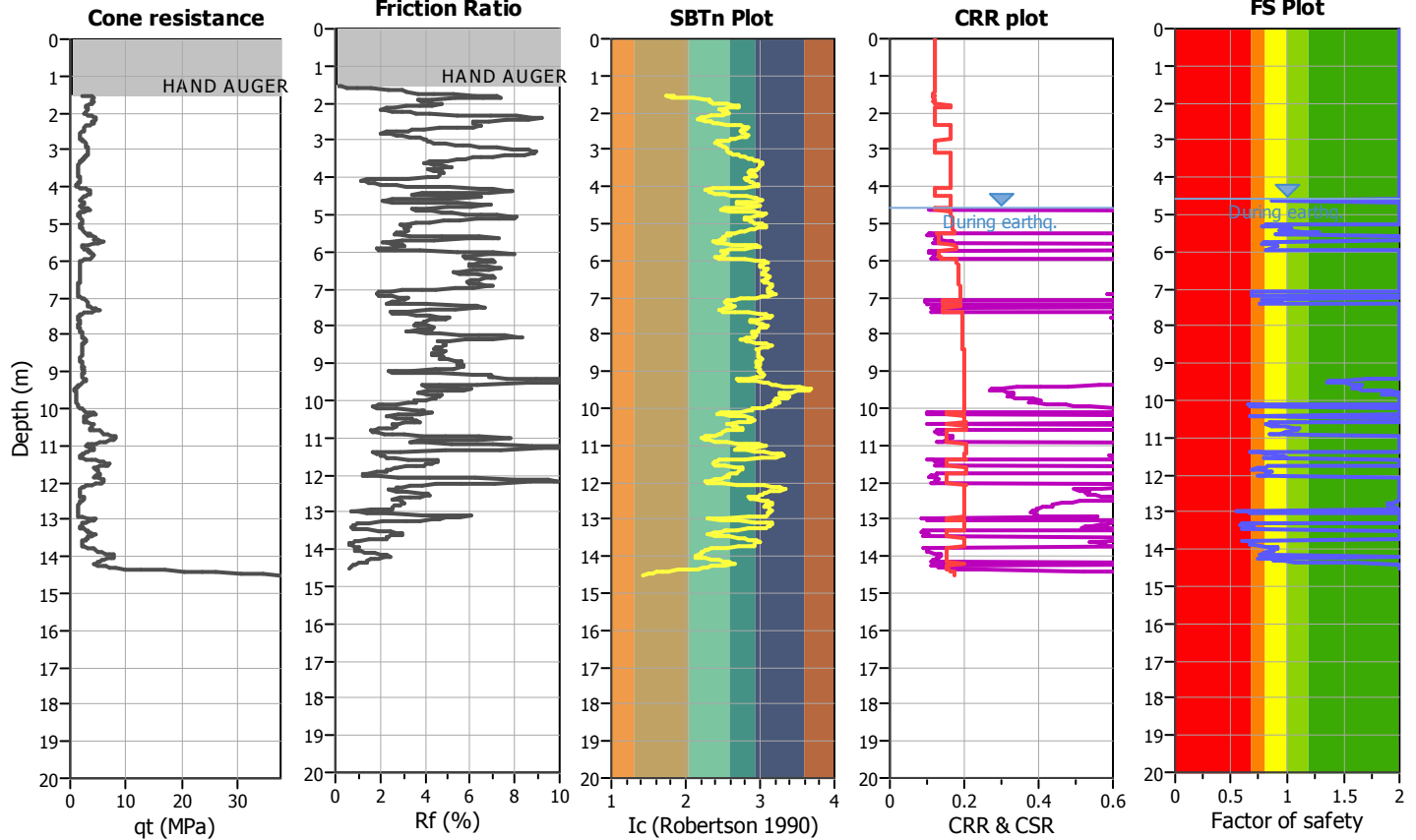
**Project title :**

**Location :**

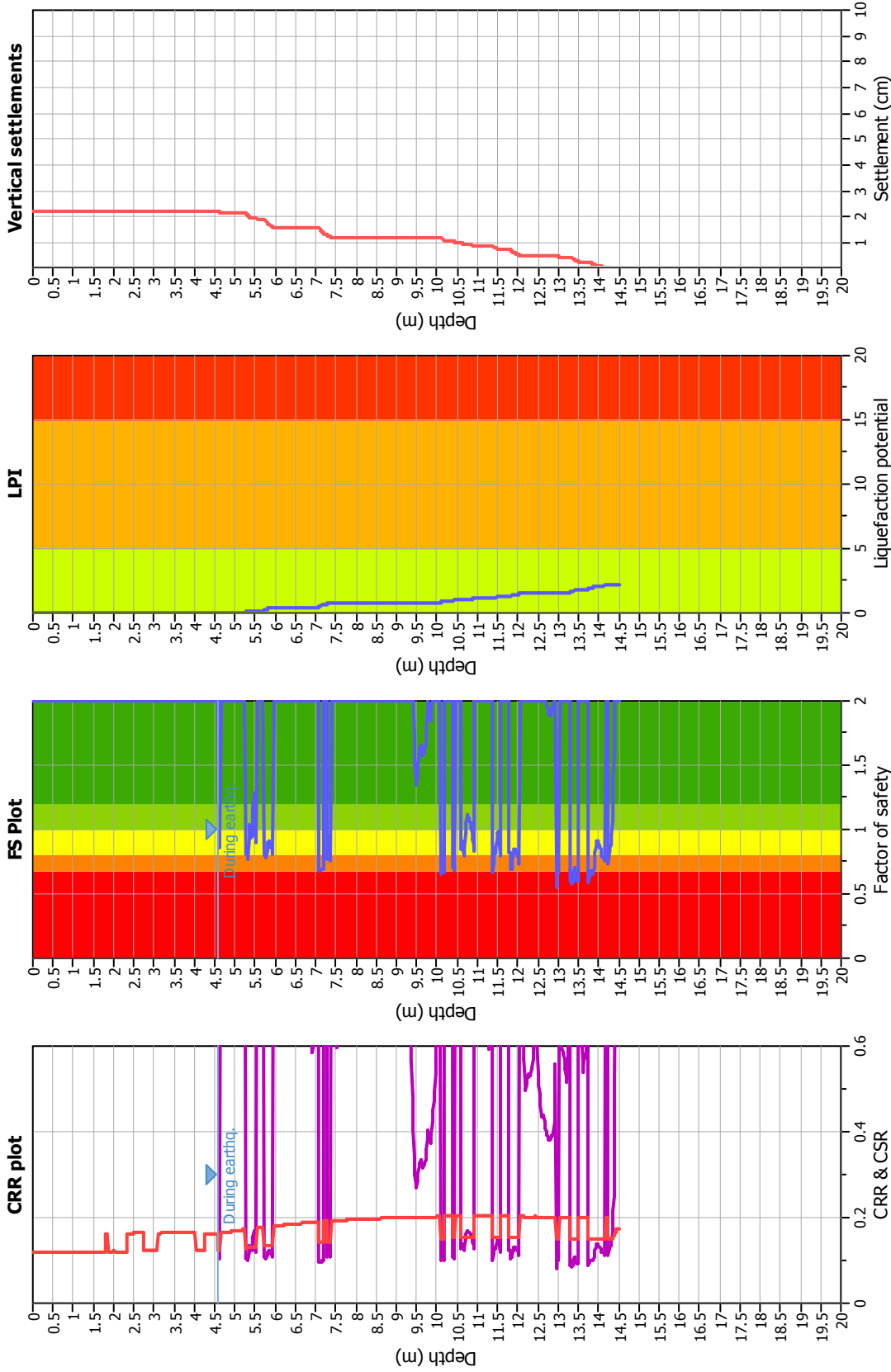
**CPT file : P362CPTU402**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	4.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	4.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.29	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



# Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.29  
 Depth to water table (insitu): 4.60 m

Depth to GWT (earthq.): 4.60 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect: applied: No  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

## F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk